



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ

INSTITUTE OF MACHINE AND INDUSTRIAL DESIGN

**VÝZKUM OPOTŘEBENÍ MATERIÁLŮ V KONTAKTU S MR
KAPALINOU**

STUDY ON WEAR OF MATERIAL IN CONTACT WITH MR FLUID

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Jiří Žáček

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Michal Kubík, Ph.D.

BRNO 2021

Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav konstruování
Student: **Bc. Jiří Žáček**
Studijní program: Strojní inženýrství
Studijní obor: Konstrukční inženýrství
Vedoucí práce: **Ing. Michal Kubík, Ph.D.**
Akademický rok: 2020/21

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Výzkum opotřebení materiálů v kontaktu s MR kapalinou

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Magnetoreologické tlumiče používají pro svoji činnost MR kapalinu, což je směs železných feromagnetických částic, nosné kapaliny a aditiv. Železné částice v MR kapalinách způsobují významnou abrazi funkčním částí tlumiče, což výrazně snižuje jejich životnost ve srovnání s tlumiči pracující s hydraulickým olejem. Životnost tlumiče a cena samotné MR kapaliny jsou v současné době hlavním problémem výrazného rozšíření této technologie. Nalezení vhodných materiálů s vyšší odolností proti opotřebení či úprava samotné MR kapaliny může vést k významnému zvýšení konkurenceschopnosti této technologie.

Typ práce: výzkumná

Výstup práce: publikační výsledek (J, D)

Projekt: GAČR

Cíle diplomové práce:

Hlavním cílem diplomové práce je porovnat opotřebení polymerních materiálů vhodných pro konstrukci těsnících prvků v kontaktu s magnetoreologickou kapalinou a stanovit vliv jejího složení na opotřebení.

Dílčí cíle diplomové práce:

- návrh metodiky testování,
- konstrukční řešení a výroba nové hlavy pro Tribometr Bruker UMT,
- návrh a výroba testovacích vzorků z polymerních materiálů,
- stanovení vlivu koncentrace částic v magnetoreologické kapalině,
- porovnání opotřebení způsobené magnetoreologickou kapalinou s a bez aditiv,
- výběr vhodného materiálu pro konstrukci těsnění magnetoreologického tlumiče.

Požadované výstupy: průvodní zpráva, fotografická dokumentace, digitální data.

Rozsah práce: cca 72 000 znaků (40 – 50 stran textu bez obrázků).

Časový plán, struktura práce a šablona průvodní zprávy jsou závazné:

<http://www.ustavkonstruovani.cz/texty/bakalarske-studium-ukoncení/>

Seznam doporučené literatury:

ASTM International. ASTM G 75-07 Standard Test Method for Determination of Slurry Abrasivity (Miller Number) and Slurry Abrasion Response of Materials (SAR Number). American Society for Testing and Materials, 2009, 1–9.

SIEGMANN, S., O. BRANDT a M. DVORAK. Thermally sprayed wear resistant coatings with nanostructured hard phases. Journal of Thermal Spray Technology, 2004, roč. 13, č. 1, s. 37–43.

WANG, S. H., J. JIANG a M. M. STACK. Methodology Development for Investigation of Slurry Abrasion Corrosion by Integrating an Electrochemical Cell to a Miller Tester. Journal of Bio- and Tribo-Corrosion, 2015, roč. 1, č. 2, s. 1–9.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2020/21

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Martin Hartl, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Dilomová práce je zaměřena na kritické místa magnetoreologického (MR) tlumiče z hlediska životnosti, a to především na těsnění pístnice tlumiče. Úkolem této práce je najít vhodný materiál pro konstrukci těsnění, a k tomu pochopit, které vlastnosti MR kapalin mají největší vliv na opotřebení tohoto těsnění. Testy byly provedeny v upravené konfiguraci pin-on-flat. V rámci práce bylo otestováno několik druhů polyuretanů, NBR, SBR a PTFE, což jsou materiály vhodné pro těsnící prvky. U MR kapalin byl posuzován vliv koncentrace MR částic, vliv modifikací a stáří MR kapaliny. Ukázalo se, že nejvhodnější materiálem pro těsnění je H-PU95FDA. U MR kapalin byl vliv koncentrace částic vyhodnocen jako minimální, zatímco vliv modifikací a stáří kapalin má velkou roli na abrazivitu MR kapalin a tím i životnost MR tlumiče.

KLÍČOVÁ SLOVA

Magnetoreologická kapalina, tlumič, abraze, opotřebení, těsnění

ABSTRACT

This paper is focused on MR dampers and its critical parts in term of damper`s durability, which seems to be a piston-rod seals, and it should find an ideal material combination of seal and MR fluid for increasing the damper`s life. The tests were conducted in modified pin-on-flat configuration, which was supposed to be more suitable for laboratory testing. There was tested and compared a suitable material for seals, like PTFE, NBR, SBR of polyurethanes. The article is also focused on MR fluids and its contribution to seal`s wear. The impact of particle concentration, wear of MR fluid and effect of modification of MR fluid was tested. It showed up, that the best material for seal is H-PU95FDA. The effect of particle concentration is negligible on seal`s wear, while effect of modification and wear of MR fluids are significantly higher.

KEYWORDS

Magnetorheological fluid, shock absorber, abrasion, wear, seals

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

ŽÁČEK, JIŘÍ. *Výzkum opotřebení materiálů v kontaktu s MR kapalinou*. Brno, 2021, 86 s.
Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav konstruování. Vedoucí
diplomové práce Ing. Michal Kubík, Ph.D.

PODĚKOVÁNÍ

Na tomto místě bych rád poděkoval svému vedoucímu práce Ing. Michalu Kubíkovi, Ph.D. za odborné vedení práce a značnou trpělivost při jejím vypracování. Dále děkuji všem, kdo jakoukoliv odbornou radou pomohli ke zdárnému dokončení této práce. A v neposlední řadě bych rád vyjádřil díky všem, kteří mi dali šanci studovat na VUT, tedy především svým rodičům.

PROHLÁŠENÍ AUTORA O PŮVODNOSTI PRÁCE

Prohlašuji, že diplomovou práci jsem vypracoval samostatně, pod odborným vedením Ing. Michala Kubíka, Ph.D. Současně prohlašuji, že všechny zdroje obrazových a textových informací, ze kterých jsem čerpal, jsou řádně citovány v seznamu použitých zdrojů.

.....

Bc. Jiří Žáček

OBSAH

1	ÚVOD	13
2	PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ	14
2.1	Magnetoreologická kapalina	14
2.2	Magnetoreologický jev	15
2.3	Magnetoreologické tlumiče	16
2.3.1	Konstrukce magnetoreologických tlumičů	16
2.4	Vliv vlastností MR kapalin na opotřebení	17
2.4.1	Mechanism of abrasive wear in lubricated contacts [14]	18
2.4.2	Influence of loading, contamination and additive on the wear of a metallic pair under rotating and reciprocating lubricated sliding	19
2.4.3	Sliding wear behavior of magnetorheological fluid for brass with and without magnetic field	20
2.4.4	Tribological Characteristics Modification of Magnetorheological Fluid	20
2.4.5	Wear by hard particles	21
2.4.6	Effect of abrasive particle size on abrasive wear of hardfacing alloys	22
2.4.7	The effect of particle hardness and shape when abrasive water jet milling titanium alloy Ti6Al4V	23
2.4.8	The effect of particle concentration in a magnetorheological suspension on the performance of a boundary lubricated contact	24
2.5	Opotřebení polymerních materiálů	25
2.5.1	Wear Testing of Seals in Magneto-Rheological Fluids	25
2.5.2	Accelerated wear testing of polyurethane hydraulic seal	26
2.5.3	Wear of elastomeric seals in abrasive slurries	28
2.5.4	Abrasive wear behavior of PTFE for applications under abrasive-atmosphere sliding control	28
2.5.5	Study of Abrasive Wear Volume Map for PTFE and PTFE Composites	29
2.5.6	Sliding wear behavior of PTFE composites	30
2.5.7	The friction and wear mechanism of O-rings in magnetorheological damper: Numerical and experimental study	31
3	ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE	34
3.1	Analýza opotřebení	34
3.2	Analýza kritických míst z hlediska opotřebení v MR tlumiči	35
3.3	Cíle práce	37
3.4	Vědecké otázky a hypotézy	37
4	MATERIÁL A METODY	39

4.1	Metodika testování	39
4.2	Konfigurace testu	40
4.2.1	Konstrukce hlavy tribometru	41
4.2.2	Návrh kinematických a dynamických podmínek testu	43
4.2.3	Metodika vyhodnocení opotřebení	43
4.2.4	Testovací vzorky	46
4.2.5	Plán testů	50
4.3	Použitá zařízení	51
4.3.1	Tribometr Bruker UMT Tribolab	51
4.3.2	Profilometr Bruker Contour GT-X	52
5	VÝSLEDKY	53
5.1	Konstrukce uchycení pinu a vzorku	53
5.1.1	Výběr pinu	53
5.1.2	Konstrukce držáku	53
5.1.3	Uchycení vzorku	54
5.2	Výsledky měření abrazivity v kontaktu s polymerním materiálem	55
5.2.1	Testy parametrů	55
5.2.2	Testy odolností materiálů	57
5.2.3	Testy abrazivity MR kapalin	59
5.2.4	Vliv degradace MR kapaliny na opotřebení	60
5.2.5	Vliv komponent MR kapaliny na opotřebení	62
6	DISKUZE	65
7	ZÁVĚR	69
8	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	70
9	SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN	74
9.1	Seznam zkratk	74
9.2	Seznam veličin	74
10	SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ	75
11	SEZNAM TABULEK	78
12	SEZNAM PŘÍLOH	79
	PŘÍLOHY	80

1 ÚVOD

Magnetoreologické (MR) tlumiče jsou progresivní vývojový stupeň hydraulických tlumičů. Patří do kategorie semi-aktivních tlumičů, které jsou schopny regulovat svojí tlumicí charakteristiku. Využití této možnosti umožňuje konstrukci strojů, jež jsou nejenom efektivnější, ale také uživatelsky přívětivější. Magnetoreologické tlumiče mají, na rozdíl od ostatních semi-aktivních řešení, rychlejší odezvu a jsou konstrukčně jednodušší. To je také důvod, proč se Ústavy konstruování zabývá tímto konceptem tlumení.

MR tlumiče však mají i negativa. Tyto tlumiče používají MR kapalinu, což je suspenze oleje a železných částic. Z toho vyplývá, že tato kapalina je agresivnější k funkčním částem tlumiče než čistý hydraulický olej. Nejvýrazněji se tato agresivita podepisuje na zvýšeném opotřebení funkčních ploch tlumiče. Proto mají tyto tlumiče předpoklad menší životnosti než hydraulické tlumiče plněné čistým olejem.

Ne všechny funkční plochy tlumiče se ovšem opotřebovávají stejně rychle. Pro efektivní zvýšení životnosti je nutné se zabývat těmi částmi konstrukce, které nejrychleji ztrácí funkčnost z důvodu nadměrného opotřebení.

Pro zvýšení životnosti tlumiče je poté nutné najít do těchto kritických bodů vhodné materiálové dvojice, které budou schopné v agresivním prostředí MR kapaliny vydržet déle pod mezním stavem opotřebení a tím zvýšit životnost tlumiče.



Obr. 1-1 Řešení GM Magnetic Ride Control z automobilu Cadillac Seville [1]

2 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

Kapitola se zabývá poznatky důležitými pro tuto práci. Ze začátku se zabývá MR tlumiči a jejich funkcí (včetně MR kapaliny), dále se zabývá opotřebením, poté metodami měření, a nakonec je část s vědeckými pracemi, které toto téma zpracovávají, a které by mohly být přínosem pro t diplomovou práci.

2.1 Magnetoreologická kapalina

Magnetoreologická kapalina je suspenze, která v magnetickém poli dokáže změnit svoji zdánlivou viskozitu. Tato změna je často označována jako tzv. magnetoreologický efekt. MR kapalina je složena ze tří základních složek: nosné kapaliny, feromagnetických částic a aditiv.

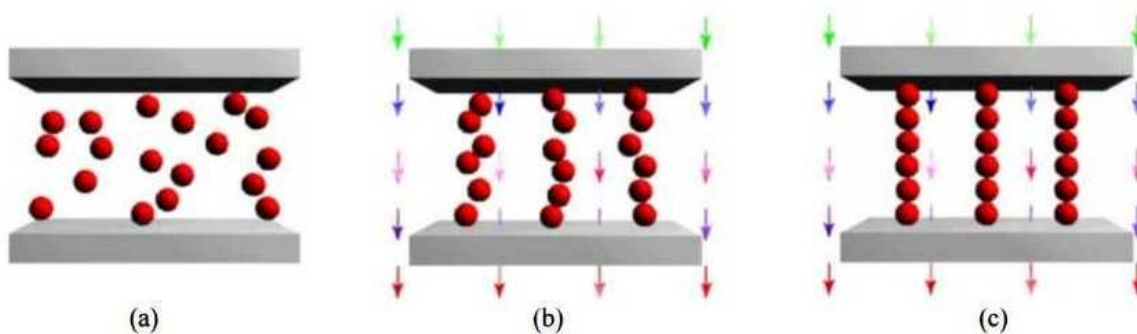
Hlavní vlastností nosné kapaliny by měla být malá viskozita a velký viskozitní index, tzn. nezávislost viskozity na teplotě kapaliny, aby nejlépe vynikl MR efekt. Nosná kapalina může být voda či různé druhy olejů. Voda je nejlevnější nosné médium a má dobrý viskozitní index, způsobuje však korozi rozptýlených železných částic a povrchů strojních součástí a tím výrazně zkracuje životnost MR kapaliny a celého zařízení. Proto je pro průmyslové MR kapaliny nevhodná. Z toho důvodu se nejčastěji používají minerální, syntetické nebo silikonové oleje. Čistě teoreticky jsou pro nosnou kapalinu vhodné relativně „řidké“ oleje [2], protože mají poměrně malou viskozitu a MR efekt může u nich nejvíce vyniknout, bohužel právě kvůli své malé viskozitě jsou poté MR kapaliny nestabilní a rychle sedimentují. Dalšími klíčovými vlastnostmi pro nosnou kapalinu by měla být chemická stabilita, nízký tlak par či malé povrchové napětí [2]. Novinkou je vývoj MR gelů na bázi polysiloxanů, které mají zamezit rychlé sedimentaci MR částic [3].

Rozptýlené mikročástice mají obvykle tvar kuliček o velikosti řádově jednotek mikrometrů (2-10 μm), při níž již nedochází k přirozenému brownovému pohybu částic [2, 4]. Nejpoužívanější jsou částice z kabonylového železa (99% čistota), protože vykazují výhodné magnetické vlastnosti (vysoká magnetická saturace až 2 T, nízký zbytkový magnetismus atd.). MR částice mohou být také vyrobeny z chemických sloučenin na bázi železa v kombinaci s kobaltem, manganem, mědí, niklem, titanem, uhlíkem a zinkem, nebo se také částice povlakuji pro snížení sedimentace a opotřebením [5]. Koncentrace MR částic v jednotlivých MR kapalinách se liší a mohou se vyskytovat v objemovém poměru od 10 do 50 % s nosnou kapalinou [2], přičemž neoptimálnější MR vlastnosti vykazuje kapalina při 31 % [6].

Nejpoužívanější aditiva v MR kapalinách jsou surfaktanty a stabilizátory, které mají za úkol snižovat sedimentaci [2, 7]. Dále se používají aditiva na úpravu reologických či tribologických vlastností kapaliny.

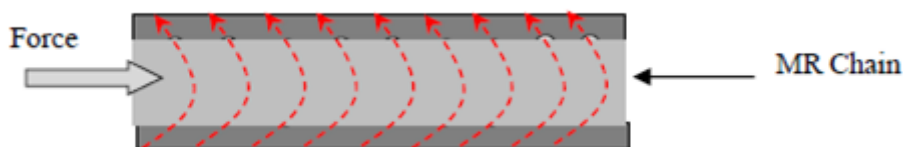
2.2 Magnetoreologický jev

MR jev vzniká v MR kapalině, která se nachází v magnetickém poli. MR částice zareagují na přítomnost pole a vznikne v nich indukovaný magnetický dipól. Tyto částice se poté řetězí (obr. 2-1). Tento proces řetězení ovlivňuje fyzikální vlastnosti MR kapaliny. Nejvýznamnější změnou je výrazné zvýšení zdánlivé viskozity kapaliny, známé také jako magnetoreologický jev, a to především ve směru kolmém na řetězcí se částice. Děj je plně reverzibilní, tzn. po přerušení magnetického toku skrz kapalinu se MR částice rozvolní a rozptýlí. Kapalina tak nabývá původních vlastností. Jak iniciace MR jevu, tak jeho terminace probíhá v řádu milisekund.



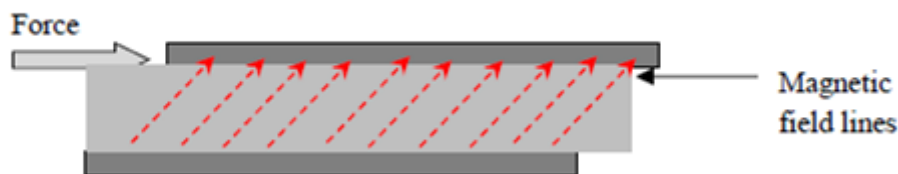
Obr. 2-1 Magnetoreologická kapalina – a) mimo magnetické pole, b) krátce po začátku působení mag. pole, c) v magnetickém poli [8]

MR efekt poté může působit v několika modech [9]. Ve ventilovém módu (obr. 2-2) prochází kapalina skrz štěrbinu mezi pevnými povrchy. Ve štěrbině dochází ke změně velikosti mag. pole, které je kolmé na směr proudění kapaliny, a tím i ke změně průtoku skrz ventil. Právě tento mód je využíván ve ventilech MR tlumičů, či jiných zařízeních, kde je potřeba regulace průtoku.



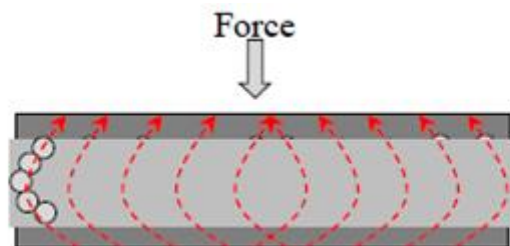
Obr. 2-2 Ventilový mód [10]

Dalším mód je smykový (obr. 2-3) [9]. V tomto módu je kapalina mezi dvěma povrchy, které jsou ve vzájemném rotačním nebo smykovém pohybu. Magnetické pole je orientováno kolmo na povrchy, a MR efekt vytváří odpor vůči vzájemnému pohybu povrchů. Tohoto se využívá v MR spojkách či brzdách.



Obr. 2-3 Smykový mód [10]

V tlakovém módu (obr. 2-4) je kapalina mezi dvěma povrchy [9]. Povrchy se v tomto případě konají pohyb kolmý na sebe, tzn. se přibližují nebo oddalují, pouze ovšem ve vzdálenostech několika milimetrů. Stejně jako v případě předchozích módů, i zde je mag. pole kolmé na povrchy a velikost odporové síly MR kapaliny je řízena velikostí MR jevu.



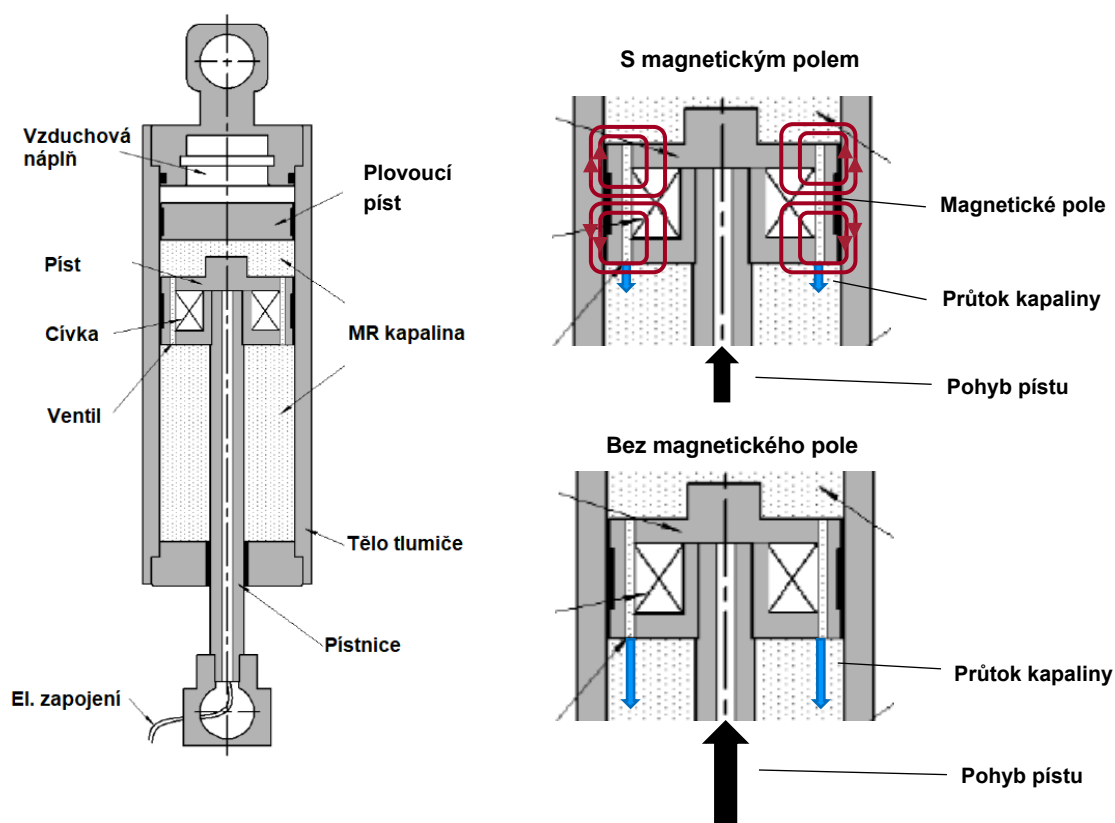
Obr. 2-4 Tlakový mód [10]

2.3 Magnetoreologické tlumiče

2.3.1 Konstrukce magnetoreologických tlumičů

MR jev je jednou z možností, jak semiaktivně řídit tlumiče. Tlumič musí být náležitě upraven, aby byl schopen využívat toho jevu. MR tlumiče využívají jednoplášťovou plynokapalinovou konstrukci, ovšem místo klasického hydraulického oleje používají MR kapalinu a způsob jejich regulace je jiný, což se odráží na konstrukci tlumiče (obr. 2-5).

V jednoplášťovém tlumiči dochází k disipaci energie pomocí přepouštění kapaliny z jedné strany pístu na druhou. Obvykle se tomu tak děje skrz ventily, které pro regulaci průtoku oleje využívají planžety. MR tlumiče taky využívají ventilů v pístu pro přepouštění kapaliny. Tyto ventily jsou vlastně jenom kanálky a nemají žádné planžety, které regulují průtok MR kapaliny. Kolem ventilů jsou navinuty cívky, které vytváří ve ventilu magnetické pole. V takovém případě dohází v kanálku k ventilovému módu MR efektu. Druhá možnost disipace a regulace je přepouštění MR kapaliny štěrbinami kolem pístu a stěnou válce. Opět je v okolí štěrbin přítomný zdroj mag. pole. V tomto případě se regulace děje ve smykovém módu. V závislosti na proudu procházejícím cívkou, je v cívkách indukované magnetické pole a tím je řízen průtok MR kapaliny z jedné strany pístu a druhou.



Obr. 2-5 Schéma a regulace MR tlumiče [11] (upraveno)

2.4 Vliv vlastností MR kapalin na opotřebení

Opotřebení materiálu lze definovat jako změnu povrchu nebo rozměrů těles při tření dvou třecích ploch v kontaktní dvojici. Dle normy ČSN 01 5050 je opotřebení definováno jako nežádoucí trvalá změna povrchu, způsobená vzájemným působením funkčních povrchů nebo funkčního povrchu a opotřebovávajícího média [12].

Stachowiak a Kato dělí opotřebení na 3 základní druhy [13]: mechanické, chemické a teplotní. Protože MR kapalina, ačkoliv se při práci zahřívá, je stále poměrně chladná a odvádí teplo, a zároveň není chemicky agresivní, je mechanické opotřebení hlavním druhem degradace tlumiče. Stachowiak [13] ještě dělí na abrazivní, adhezivní, erozivní a únavové, přičemž abrazivní opotřebení je hlavním činitelem opotřebení v tlumiči.

V této kapitole jsou popsány práce, které se zabývají opotřebením povrchů v kontaktních dvojicích a za přítomnosti abrazivních částic (nejlépe MR kapaliny nebo obsahující podobnou testovací konfiguraci, či materiálovou dvojici, jaká by mohla být použita v této práci).

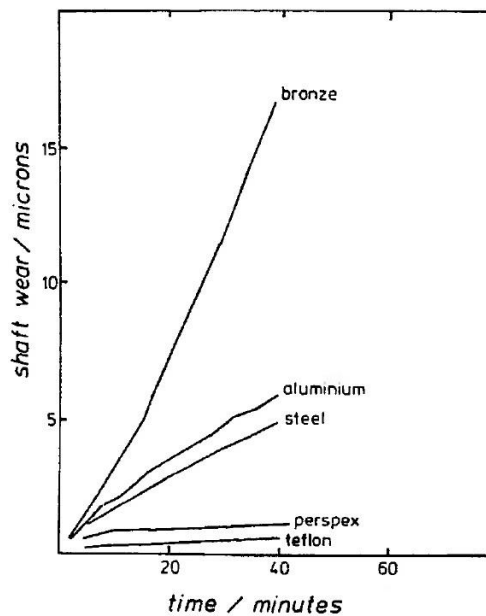
2.4.1 Mechanism of abrasive wear in lubricated contacts [14]

V této práci zkoumali autoři vliv rozměrových parametrů abrazivních částic v mazivu na opotřebení materiálu v kontaktu, tzv. three body abrasion. Autoři uvažovali hlavně nečistoty v oleji vytvořené předchozím opotřebením.

Pro testování si sestavili specializované zařízení pro simulaci kluzného ložiska. Ložisko bylo ponořené do olejové lázně z hydraulického oleje Shell HVI-60 a byly přidány abrazivní částice z karbidu křemíku v poměru 1g/1l (MR kapalina až 6500g/1l). Poté byl válec zařízení roztočen tak, aby simuloval různé výšky mazacího filmu v ložisku.

Při testu bylo zjištěno, že se započtením geometrie je možné považovat tloušťku mazacího filmu ve velikosti okolo 2násobku velikosti abrazivní částice dostatečnou, aby byla abraze snížena na minimum.

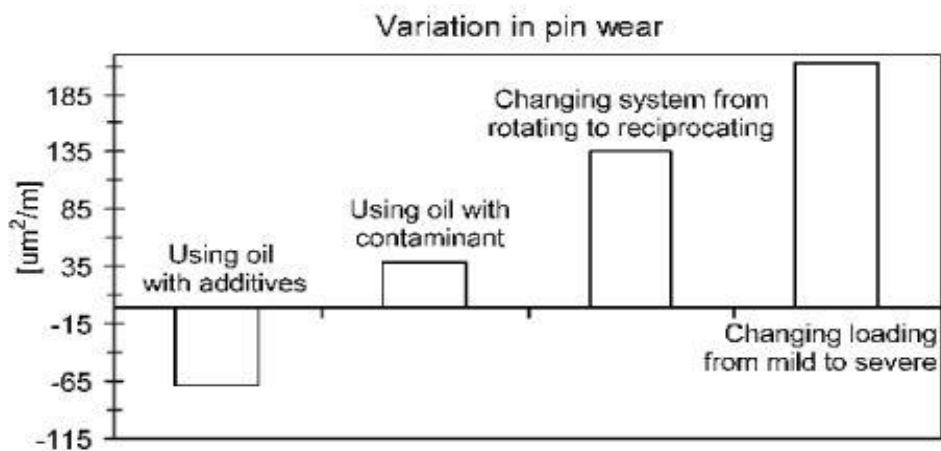
Protože bylo měření provedeno na několika materiálech, byl zkoumán i tady tento vliv. Bylo zjištěno, že pokud dva povrchy mají stejnou tvrdost, opotřebovávají se rovnoměrně, pokud však je jeden materiál znatelně měkčí, a to měkčí i než abrazivní částice, zarývají se do něho abrazivní částice, a tyto pak narušují tvrdší povrch daleko více. Z materiálu nejlépe odolával zarývání částic teflon, a proto taky byla testovací hřídel nejméně opotřebena. Naopak nejhůře dopadl bronz (viz. obr. 2-6).



Obr. 2-6 Vliv materiálu na opotřebení [14]

2.4.2 Influence of loading, contamination and additive on the wear of a metallic pair under rotating and reciprocating lubricated sliding

Tato obsáhlá práce zkoumá vliv změny dynamických parametrů testu, konfigurace testu, abrazivních částic a aditiv v mazivu na velikost opotřebení. Byla zkoumána odchylka při změně konfigurace pin-on-disk na pin-on-plate [15]. Byly zvoleny dva parametry rychlosti a zatížení (obojí by mělo být v EHD nebo smíšeném režimu). Také byl proveden test s aditivy (antiwear, extreme pressure, protizpěňovací, antickorozivní) v poměru 3 % hmotnosti oleje, bohužel jejich složení nebylo uvedeno. Abrazivní částice byly z křemíku o průměrné velikosti 15 μm v koncentraci 0,5 g/l. Testy byly provedeny při všech možných kombinacích těchto parametrů.

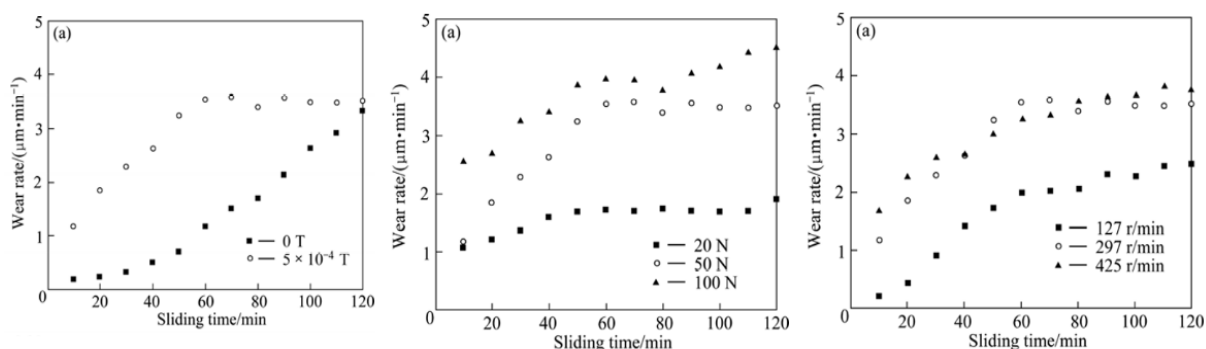


Obr. 2-7 Vliv parametrů na opotřebení materiálu [15]

Z výsledků (na obr. 2-7) vyšlo, že test při recipročním pohybu vykazoval větší míru opotřebení, než na konfiguraci pin-on disk. Kontaminace kontaktu měla výraznější roli na opotřebení při menším zatížení a vyšší rychlosti. Vliv přísad byl také patrný, a to nejenom na velikost opotřebení, ale i na morfologii povrchu, kdy při použití aditiv byl povrch hladší.

2.4.3 Sliding wear behavior of magnetorheological fluid for brass with and without magnetic field

V této práci byla zkoumána přímo MR kapalina MRF132-DG od společnosti Lord a vliv zatížení pinu a kluzné rychlosti na opotřebení bronzového pinu s bronzovým diskem v konfiguraci pin-on-disk na velikost opotřebení [16].



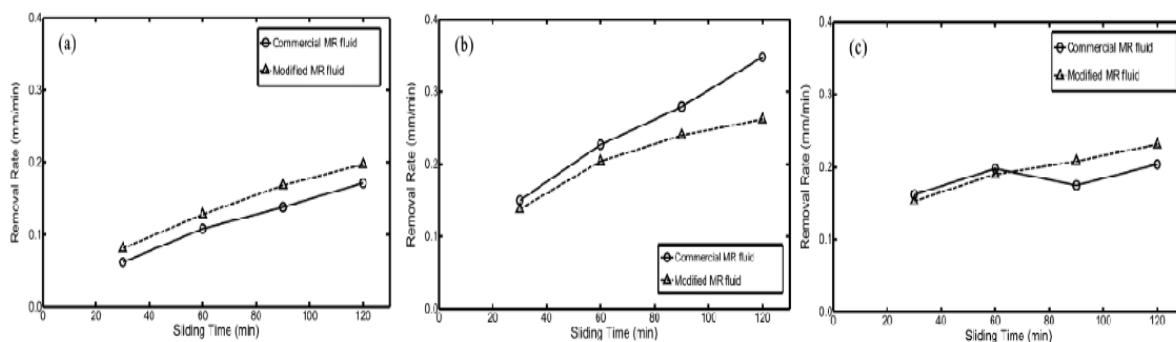
Obr. 2-8 Výsledky z měření opotřebení [17]

Výsledky z experimentů jsou znázorněné na obr. 2-8. Bohužel velikost poloměru dráhy pinu po disku není uvedena (pouze průměr disku – 60 mm), tak není možné dopočítat vzájemnou rychlost pinu a disku. Pin není na stykové ploše zakulacený a má průměr 5 mm. To znamená, že pin vyvíjel na disk tlak 1,02, 2,54 resp. 5,09 MPa. Zajímavostí je i změřená drsnost povrchu, kdy před testem dosahovala průměrné R_a 1,05 μm , která se po testu zvýšila na R_a 7,57 μm .

2.4.4 Tribological Characteristics Modification of Magnetorheological Fluid

Práce se zabývala měřením tribologických vlastností kontaktu oceli C45E a kapaliny MRF-132DG [18]. Také byl zkoumán vliv aditiv na opotřebení. Kapalina byla modifikována dialkyldithiofosfátem zinku (Zn-DTP), dithiokabamátem molybdenu (Mo-DCP) a aminovým antioxidantem. Měření bylo provedeno v konfiguraci „four ball“ a „pin on disk“.

V případě testu four ball byly podmínky následující – zátěžná síla byla 40 N a rychlost otáčení 1200 ot. /min (rpm). V případě testu pin on disk byly parametry zvoleny takto – zátěžná síla 50 a 100 N a rychlost otáčení disku 297 rpm a 425 rpm. A stejně jako v kapitole 2.4.3 nebylo řečeno po jakém poloměru se klouzal pin, a tudíž rychlost je neznámá.

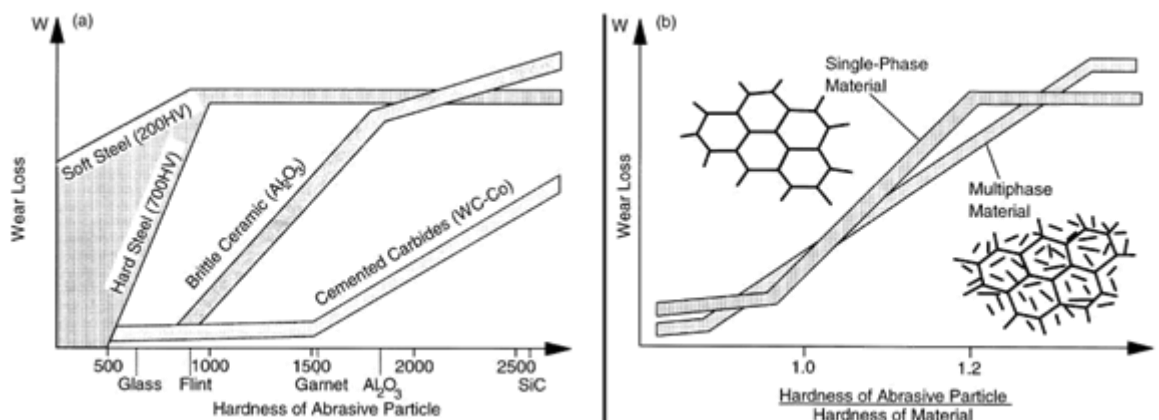


Obr. 2-9 Výsledky pro experiment v konfiguraci pin-on-disk - vlevo: 50 N a 297 rpm, uprostřed: 100 N a 297 rpm, vpravo: 50 N a 425 rpm [18]

Dle výsledků znázorněných na obr. 2-9 je vliv aditiv v MR kapalině zjevný. Při testu four ball snížila aditiva opotřebení o polovinu. I při testování v konfiguraci pin on disk snížily opotřebení, a to především při vyšší zátěži. Vliv zátěže je také znatelný a roste se vzdáleností. Naopak není tak významný, velikost opotřebení zůstává přibližně stejná.

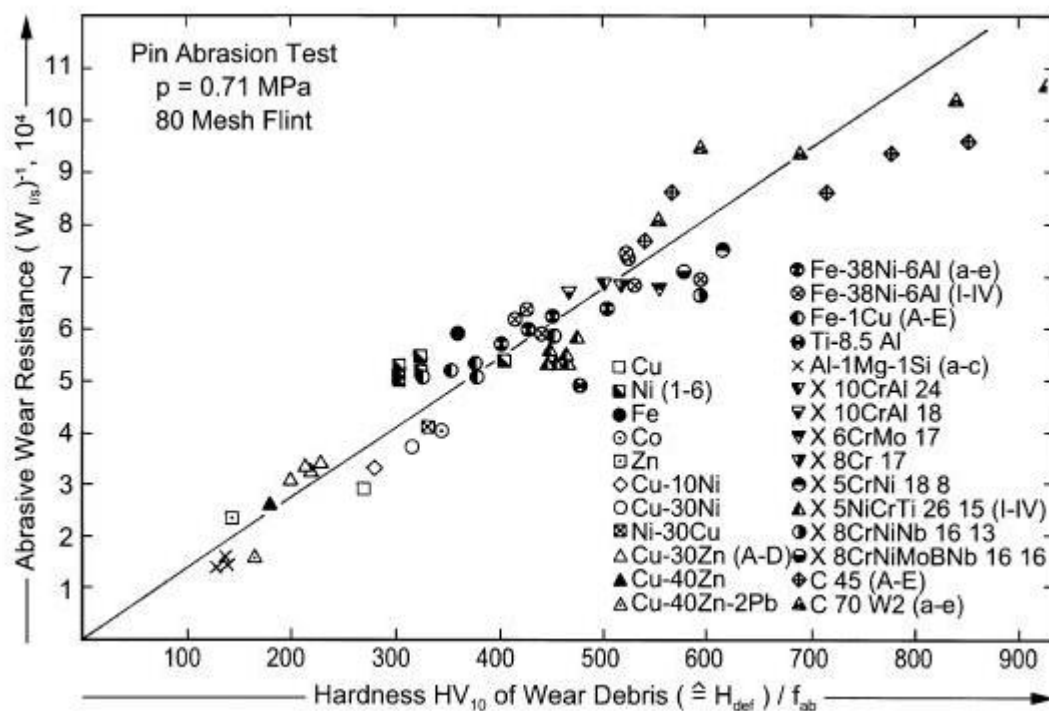
2.4.5 Wear by hard particles

Již ve svém článku [19] vydaném v roce 1987 se Gahr věnoval tranzitnímu chování opotřebení v závislosti na tvrdosti částic. V tomto případě jde o suchou abrazi, bez maziva. V tom článku zjistil, že transitní chování nastává při poměru tvrdosti abrazivních částic a materiálu cca 1 (obr. 2-10). Velikost opotřebení po překonání této hranice roste až o 2 řády. U více fázového materiálu je tato hranice méně ostrá.



Obr. 2-10 Velikost opotřebení v závislosti na tvrdost abrazivních částic a poměru tvrdosti částice a materiálu [19]

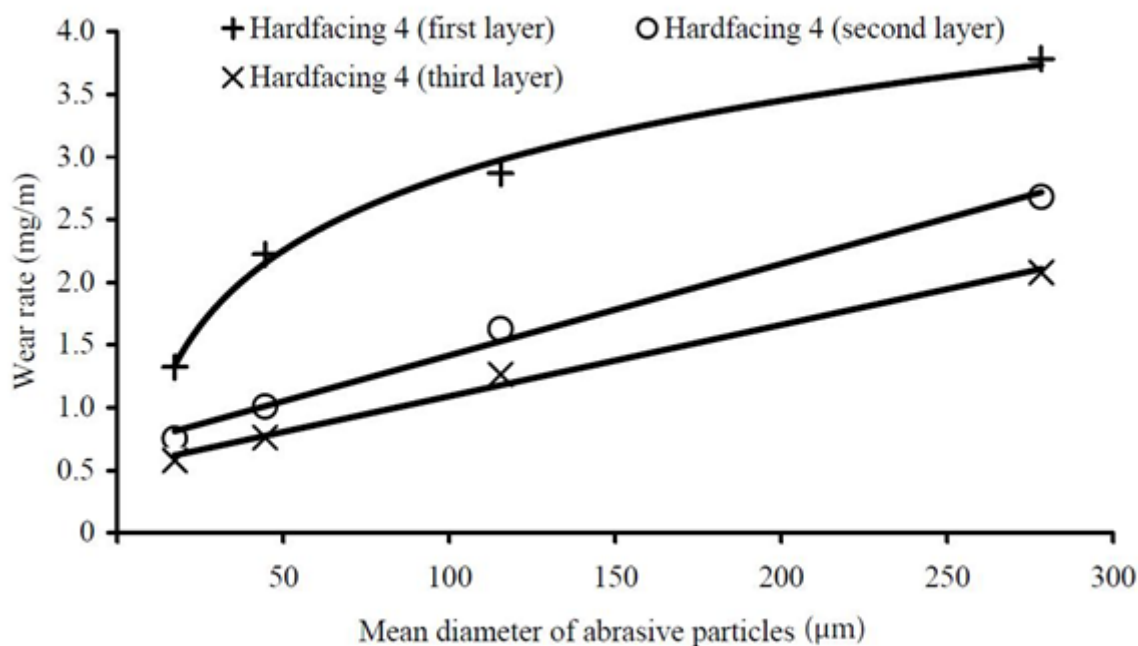
V článku Wear by hard particles [20] se Gahr zabýval vlastnostmi materiálu odolávat abrazivnímu opotřebení. Také se jedná o suchou abrazi. Metoda testování nebyla zveřejněna, je pouze popsáno, že pin působil na podložku tlakem 0,91 MPa. Bylo zjištěno, že z testovaných kovových materiálů nejhůře odolává opotřebení bronzové slitiny, nejlépe z testu vychází vysokolegované tvrdé oceli (obr. 2-11).



Obr. 2-11 Závislost resistance vůči abrazi na tvrdosti materiálu [20]

2.4.6 Effect of abrasive particle size on abrasive wear of hardfacing alloys

Tato práce [21] zkoumala vlastnosti tvrdých vrstev a jejich schopnost odolávat opotřebení. Jednou z podkapitol byl vliv velikosti abrazivních částic na velikost opotřebení. Test byl proveden metodou pin-on-disk. Také jde o test za sucha. Test by provedený s částicemi o velikosti 25; 50; 125 a 275 μm (10 – 100 větší než MR částice). Na obrázku dole (obr. 2-12) je vidět, že opotřebení je více méně lineárně závislé na velikosti částic.

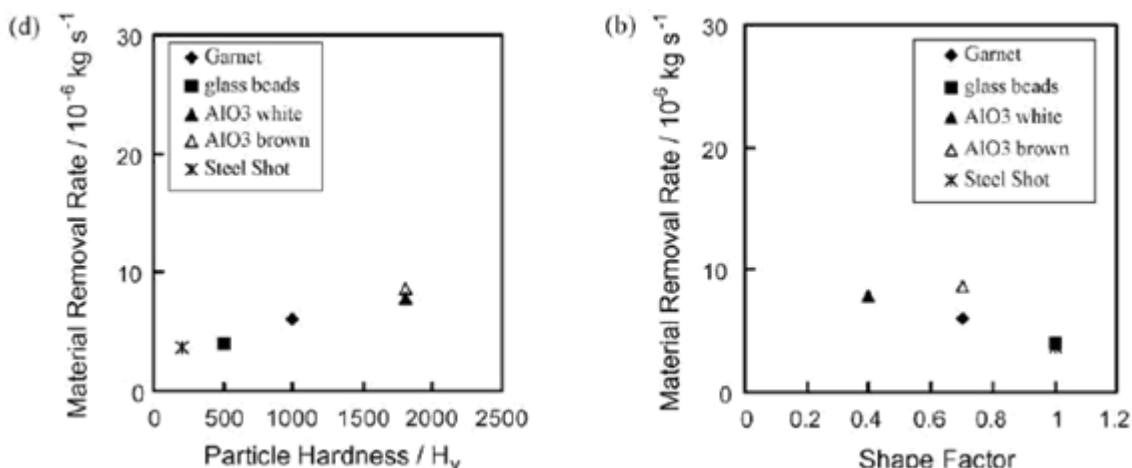


Obr. 2-12 Závislost opotřebení na velikosti (přibližně stejné výsledky vykazovaly všechny měření) [21]

2.4.7 The effect of particle hardness and shape when abrasive water jet milling titanium alloy Ti6Al4V

Fowler [22] v této práci zkoumal vliv abrazivního působení částic v řezném paprsku. Zkoumal tvrdost a tvar těchto částí na abrazivní činnost paprsku. Byly zkoumány částice různých tvrdostí (sklo – 500 Hv; bílý a hnědý oxid hlinitý – 1800 Hv; Granát – 1000 Hv; ocelové kuličky – 200 Hv). Také byl zkoumán vliv tvaru, který byl definován poměrem mezi nejmenším a největším poloměrem na částici. Poměr 1 teda znamená kulaté těleso.

Dle výsledků (obr. 2-13) vychází, že čím méně kulaté těleso, tím větší vliv má na abrazivní opotřebení. Také čím tvrdší materiál je použit, tím má tato částice větší schopnost způsobovat opotřebení.



Obr. 2-13 Vliv tvrdosti (vlevo) a tvaru (vpravo) na opotřebení [22]

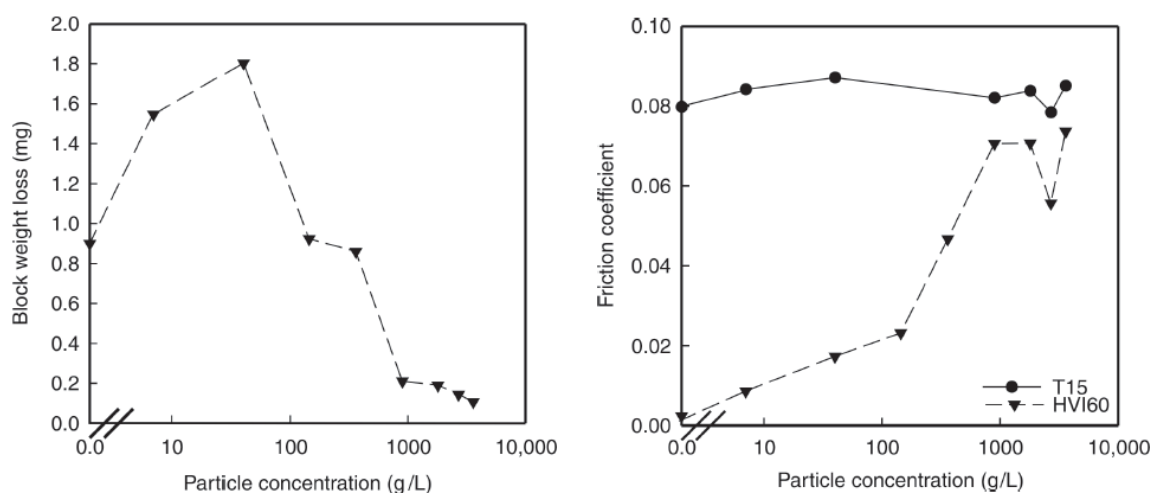
2.4.8 The effect of particle concentration in a magnetorheological suspension on the performance of a boundary lubricated contact

Hlavní složkou, která způsobuje opotřebení, jsou v MR kapalině částice. Proto se tato práce [23] věnuje vlivu koncentraci částic na opotřebení.

Měření opotřebení probíhalo na tribometru v konfiguraci block-on-ring. Blok byl vyrobený z oceli BS4659 o tvrdosti 15 HRC a jako „ring“ byl použitý vnější kroužek ložiska SKF 32206 o tvrdosti 63 HRC. K sobě byly přitlačované silou 532 N. Kluzná rychlost byla 0.32 m/s. Test trval 30 minut.

MR kapaliny byly připravené z MR částic odstředěných z kapaliny LORD132, které poté byly rozmíchány v základových olejích Tellus T15 anebo Shell HV60. Abrazivita byla měřena pomocí hmotnostního úbytku na bloku.

Bylo zjištěno (obr. 2-14), že abrazivita MR kapaliny roste se zvyšující se koncentrací MR částic, ale jen do nějaké úrovně objemového podílu částic (cca 100 g/L). Poté míra opotřebení klesá. Autoři to zdůvodňují tím, že se v kontaktu vytvoří vrstva z MR částic, která poté chrání povrch před opotřebem. Také byl naměřen koeficient tření v kontaktu v závislosti na koncentraci. Zatímco pro MR kapalinu založenou na oleji T15 byl poměrně konstantní, olej HV60 vykazoval nárůst COF se vzrůstající koncentrací částic.



Obr. 2-14 Vlevo: závislost odběru materiálu na koncentraci částic pro MR kapalinu s olejem HV60, Vpravo: závislost koeficientu tření na koncentraci částic [23]

2.5 Opotřebení polymerních materiálů

Testy v této kapitole proběhly v materiálové konfiguraci hard on soft contact, tzn. že měkčí materiál tvoří plochu, a pin je tvořen z tvrdšího materiálu. V klasické teorii EHL a Hertzova kontaktu je jedno, z kterého materiálu je tvořena jednotlivá část testovací konfigurace [24]. To ale neplatí v případě, že je jeden z materiálu významně měkčí, a to hlavně v případě, že kontaktní plocha dosahuje podobné velikosti jako rozměry pinu (zakřivení). V případě, že je plocha měkčí než pin, dochází k časově závislé deformaci měkčího materiálu, ke tvorbě valu před kontaktem a může tak dojít ke změně parametrů mazání [24], a případně i opotřebení.

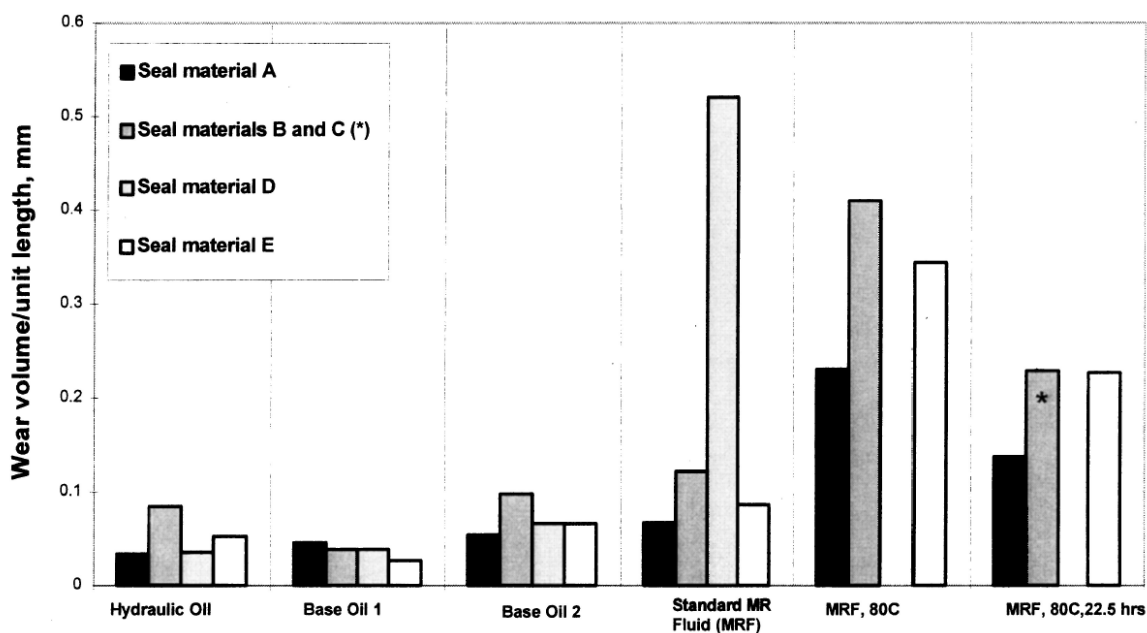
2.5.1 Wear Testing of Seals in Magneto-Rheological Fluids

Tato práce [25] popisuje interní metodu automobilového koncernu General Motors a dodavatele dílů, společnosti Delphi, pro testování odolnosti pryžových prvků v magnetoreologických tlumičích a abrazivity MR kapaliny působící na tyto prvky. Tato metoda by proto měla odpovídat podmínkám uvnitř MR tlumiče.

Testovací metoda je následující: ocelová tyčinka o průměru 12,7 mm a délce 75 mm recipročně přejíždí válcovou plochou po bloku o rozměrech 30 x 10 mm. Blok je vyroben z materiálu, z kterého je vyrobeno i těsnění v tlumiči. Tyčinka přejíždí blok s amplitudou 6,77 mm s frekvencí 10 Hz a působí na ní zatížení 80 N. Test trval 48 hodin.

V práci autoři zkoumali resistenci 4 různých materiálů na polyuretanové bázi vůči opotřebení (obr. 2-15). Zkoumali opotřebení jak v kontaktu zaplaveném hydraulickým olejem, 2 druhy základového oleje pro MR kapaliny a jednu MR kapalinou, která obsahovala 20 objemových procent MR částic o tvrdosti 50 HRB. Výsledky byly vyhodnoceny v odebraném objemu materiálu na délku drážky (mm^3/mm).

Nakonec bylo zjištěno, že těsnění vyrobené z polyuretanu mají různou odolnost vůči opotřebení. Bohužel v práci není uveden přesně popsáný materiál. Výsledky také vypovídají, že MR kapalina má větší abrazivitu než olej.

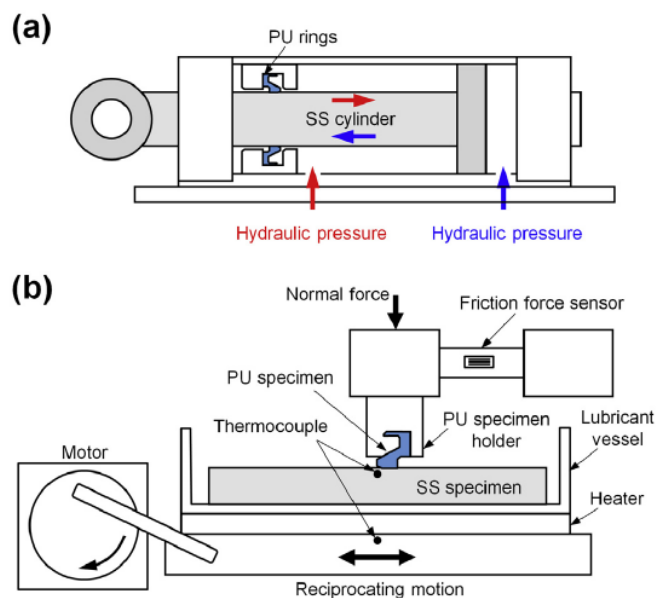


Obr. 2-15 Velikost poměrného opotřebení těsnění v závislosti na podmínkách [25]

2.5.2 Accelerated wear testing of polyurethane hydraulic seal

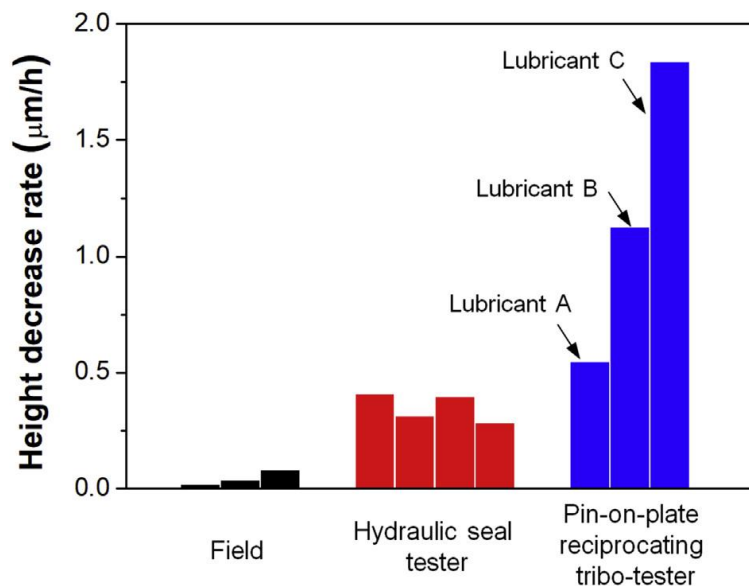
Práce se zabývala různými metodami zkoumání opotřebení polyuretanových těsnění („gufer“) [26]. Tato práce srovnávala míru opotřebení těsnících prvků v závislosti na použitém oleji. Také srovnává různé metody testování těchto těsnění.

Těsnění byly testovány přímo v terénu, když byly instalované v hydraulickém systému bagru, poté byly tyto výsledky srovnány s výsledky, které byly získané na testeru, který testoval celé těsnění a přesně napodoboval kontaktní spoj v reálném tlumiči, a s testem v konfiguraci pin-on-plate (obr. 2-16), kde se tyčinka třela po části těsnění (podobná konfigurace jako v kap. 2.5.1).



Obr. 2-16 Konfigurace pro laboratorní testy: Nahoře „reálný“ kontakt, dole konfigurace pin-on-plate [26]

Hodnotili taky vlivy olejů, které působí na těsnění. Používali hydraulický olej HV 46 a to čerstvý, použitý a znečištěný 3 mg nečistot na 10 ml oleje. Délka testů byla od 600 hodin do 2900 hodin a při všech testech se snažili dodržet tlak těsnění kolem 22 MPa. Vyhodnocení probíhalo měrným hloubkovým úbytkem těsnění za hodinu. Výsledky jsou na obr. 2-17 ukazují, že zjednodušený test pin-on-plate vykazuje mírně větší abrazivitu než zjednodušený test reálnou konfigurací a o mnoho větší abrazivitu, než test v reálném prostředí.



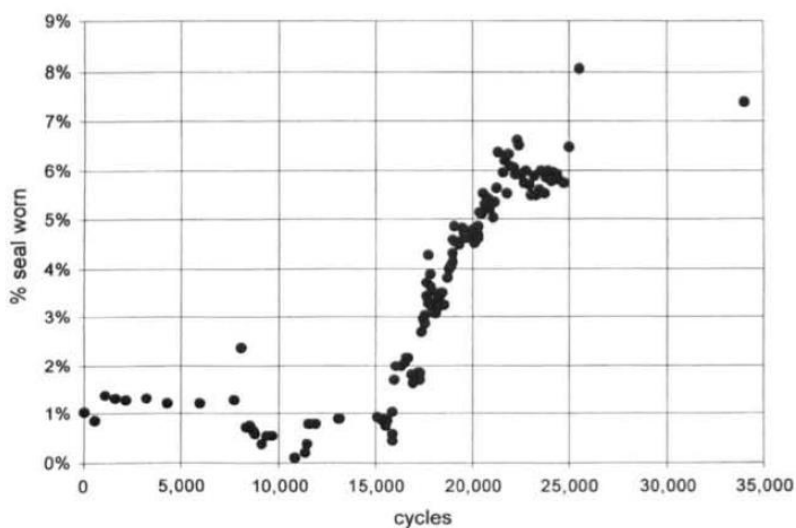
Obr. 2-17 Výsledky testů (pro konfiguraci pin-on-plate různé maziva jak uvedeno v kap. 2.5.2) [26]

2.5.3 Wear of elastomeric seals in abrasive slurries

Protože je nutné používat těsnění i v abrazivním prostředí, je nutné znát opotřebení, životnost těsnění a popřípadě je upravit. To byl cíl i autorů téhle práce [27]. Autoři se zabývali opotřebením axiálních těsnění.

Autoři použili pro test netradiční konfiguraci. Testovali celá axiální těsnění o průměru 84 mm, které přitiskli na rovnou plochu z plexiskla a tím potom recipročně pohybovali v úhlu 30° rychlosti 60 cyklů za minutu. Ložisko přitlačovali v podložce silou 2,2 kN. Kontakt byl zatopen abrazivní kapalinou. Samotné vyhodnocení pobíhalo naměřením hloubky proniknutí abrazivních částic do kontaktní plochy těsnění a plexiskla.

Samotné testování standartního těsnění přineslo následující výsledky [27]. Autoři zjistili, že do 7000 cyklů se opotřebení nijak neprojevuje na těsnosti daného spoje. Poté dochází k radikální změně trendu. Při 10000 cyklech je již opotřebení výrazné, již 1/5 těsnění byla opotřebena. Autoři zjišťovali i modifikaci těchto těsnění, upravené byly především textury povrchů těchto těsnění. Textury obsahovaly důlky nebo výstupky. Zatímco důlky se ukázaly jako kontraproduktivní a zvětšující opotřebení, výstupky mají pozitivní vliv na životnost těsnění.

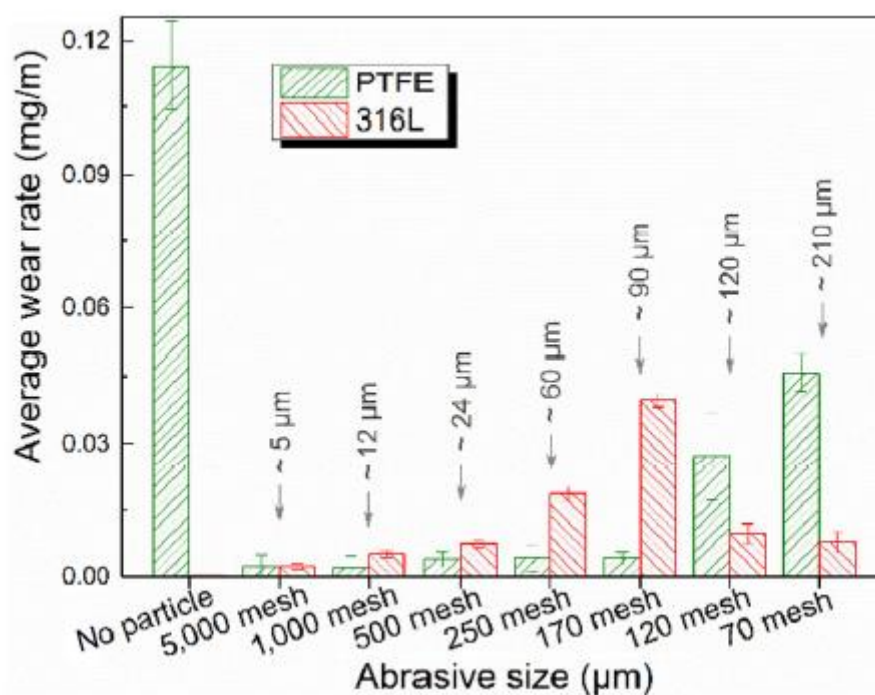


Obr. 2-18 Opotřebení standartního těsnění [27]

2.5.4 Abrasive wear behavior of PTFE for applications under abrasive-atmosphere sliding control

Tato práce [28] se zabývala vlivem velikostí abrazivních částic na opotřebení v kontaktu PTFE pinu a 316L destičky, který má simulovat opotřebení těsnících prvků. Tato práce zkoumá opotřebení v suchém kontaktu. Autoři testovali opotřebení v konfiguraci pin-on-flat, tentokrát s plochým pinem o průměru 8 mm. Pin se pohyboval po dráze s amplitudou 20 mm s průměrnou rychlostí 0,04 m/s a zatížením 100 N.

Jak již bylo zmíněno, hlavním tématem bylo zjištění, jak se bude opotřebení vyvíjet s měnící se velikostí částic (5 – 210 μm) a opotřebení bylo porovnáno s kontaktem bez částic (obr. 2-19). Výsledky jsou následující: opotřebení oceli se zvyšující se velikostí roste do určité velikosti částic (cca 90 μm) a poté klesá. U teflonu je to ještě zajímavější, protože teflon vykazoval daleko největší opotřebení v kontaktu bez částic, s nejmenšími částicemi opotřebení razantně pokleslo a poté se vzrůstající teplotou roste. Toto bylo zapříčiněno měnícími se mechanismy opotřebení. Zatímco o PTFE docházelo k delaminaci (žádné částice), 3-body pluhování (menší částice) až po adhezi (větší částice), u kovu se také zpočátku objevila 3-body abraze (menší částice), která poté mohla přejít (vlivem tvrdosti obou materiálů a velikosti částic) k odvalování částic po povrchu oceli a k tím k poklesu opotřebení.



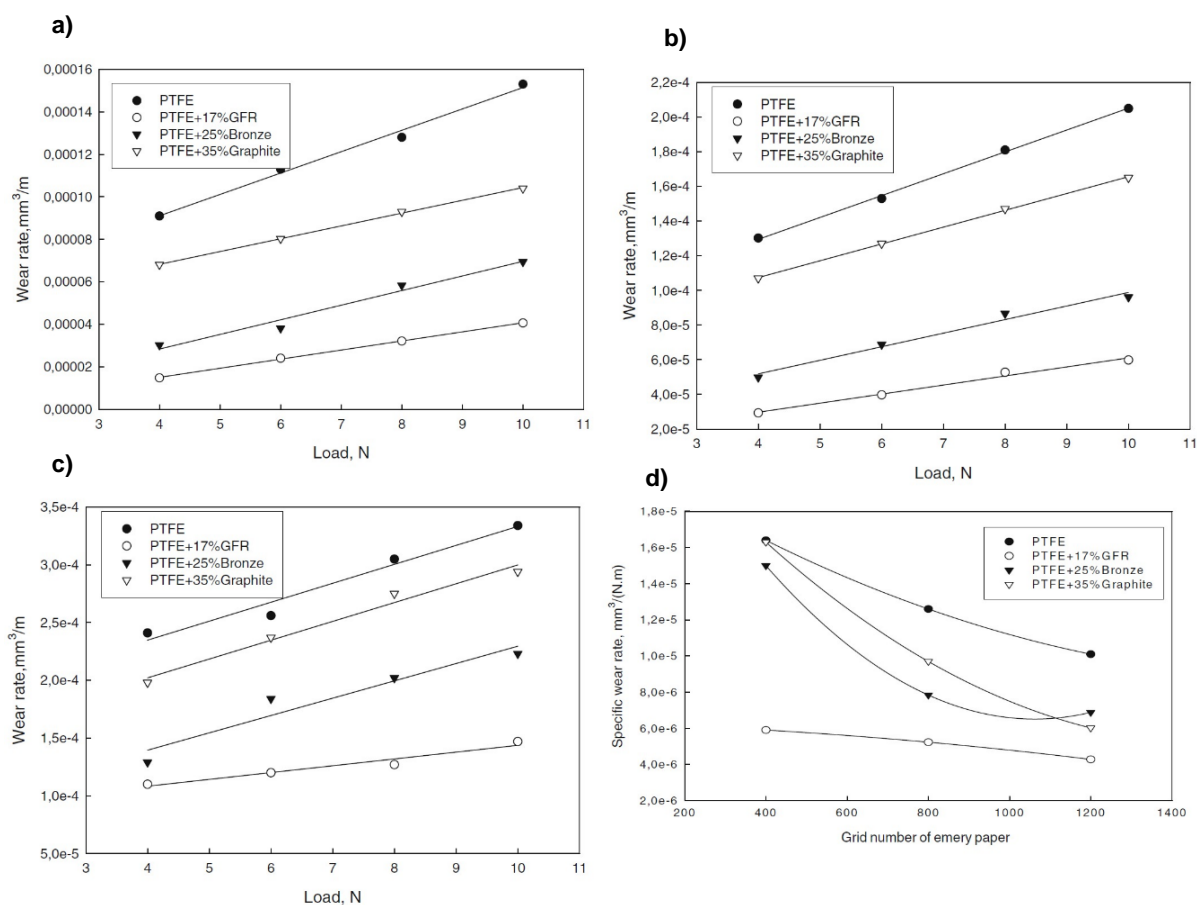
Obr. 2-19 Velikost opotřebení v závislosti na velikosti abrazivních částic [28]

2.5.5 Study of Abrasive Wear Volume Map for PTFE and PTFE Composites

V této práci studoval Unal [29] vliv odolnosti PTFE a od něho odvozených kompozitů vůči abrazivnímu opotřebení. Byly studovány materiály:

- PTFE
- PTFE + 17 % skelných vláken
- PTFE + 25 % bronzu
- PTFE + 35 % grafitu

Jeho měřicí řetězec se sestával z pinu ze zkoumaného materiálu a disku, na kterém byl nalepen brusný papír (různých zrnitostí), který vytvářel abrazivní prostředí, a to v konfiguraci pin-on-disk. Unal zkoumal závislost opotřebení komplexně a vytvořil pro dané kontakty tzv. wear mapu pro různá zatížení a rychlosti v kontaktu.



Obr. 2-20 (a – c) Závislost opotřebení na zatížení pro různé materiály – a) drsnost papíru 1200, b) 800, c) 400, d) Závislost opotřebení na drsnosti papíru pro různé materiály [29]

Z výsledků (obr. 2-20) je vidět, že nejlépe odolával opotřebení materiál PTFE + skelná vlákna, PTFE + grafit vykazoval mírně horší odolnost proti abrazi. PTFE + bronz už vykazoval horší protia abrazivní vlastnosti a jeho odolnost proti abrazi byla jen nepatrně vyšší než odolnost samotného PTFE. Tyto výsledky jsou stabilní v celé oblasti zkoumaných parametrů.

2.5.6 Sliding wear behavior of PTFE composites

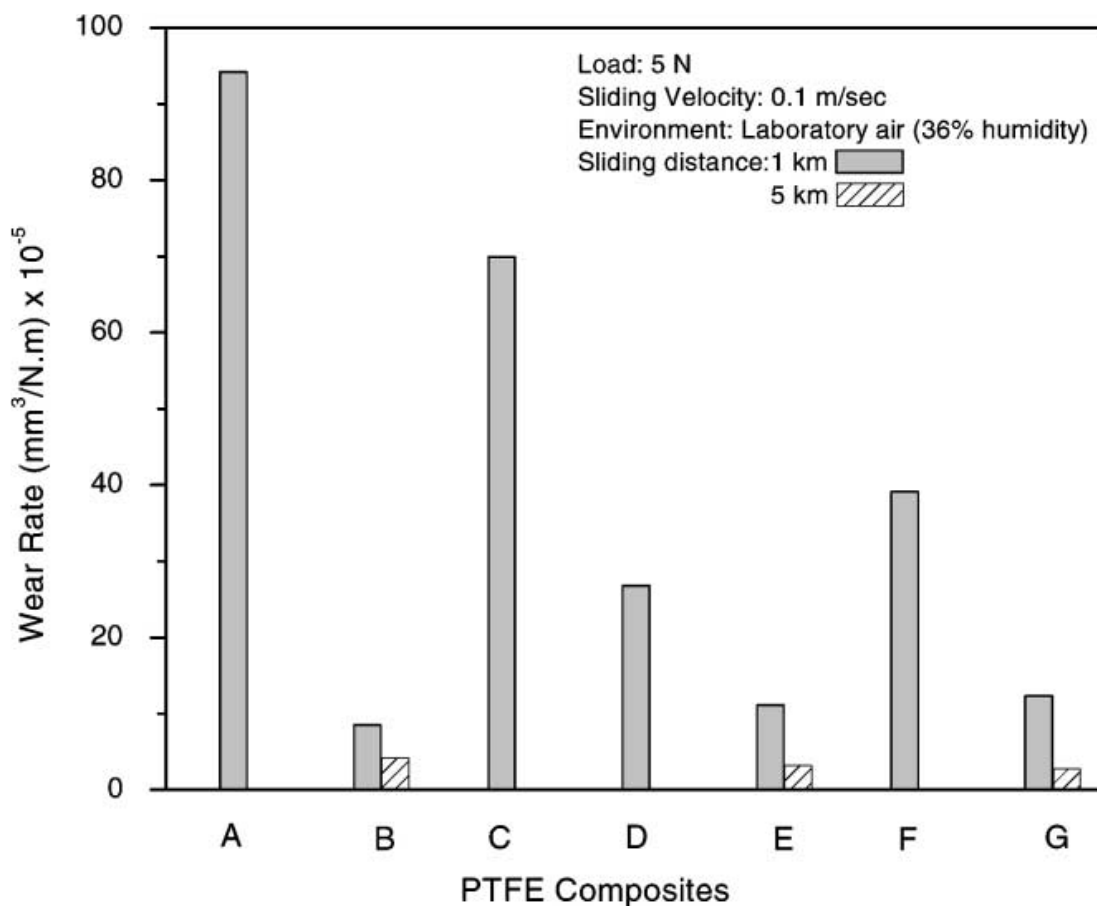
V této práci [30] byly zkoumány tribologické vlastnosti PTFE a jeho kompozitů, mezi nimi i odolnost vůči opotřebení. Opotřebení bylo zkoumáno v konfiguraci pin-on-disk, bez dodatečných abrazivních částic. Pin byl tvořen kuličkou z oceli 440C o průměru 9 mm a disk byl tvořen ze zkoumaného materiálu (obr. 2-21).

Composition (vol.%) of PTFE composites

Materials	Designation	Characteristics of filler materials
Pure PTFE	A	99% pure PTFE powder
75.0% PTFE + 18% carbon ^a + 7% graphite ^b	B	Carbon particulates 10–25 μm size + graphite flakes 25–50 μm size
85.0% PTFE + 15% E glass fibers	C	10 μm diameter fibers, 50–75 μm in length
75.0% PTFE + 25% E glass fibers	D	10 μm diameter fibers, 50–75 μm in length
75.0% PTFE + 20% E glass fibers + 5% MoS ₂	E	Fibers 10 μm diameter and 50–75 μm in length + small MoS ₂ particles with 8–10 μm diameter
97.5% PTFE + 2.5% PPDT	F	Chopped fibers 50–100 μm in length, 10–12 μm in diameter
90.0% PTFE + 10% PPDT	G	Chopped fibers 50–100 μm in length, 10–12 μm in diameter

Obr. 2-21 Zkoumané materiály [30]

Ze zkoumaných materiálů vyšel jako nejlepší materiál B, a poté materiály E a G. Jako nejhorší se ukázaly být materiály A a C (obr. 2-22).



Obr. 2-22 Výsledky měření opotřebení [30]

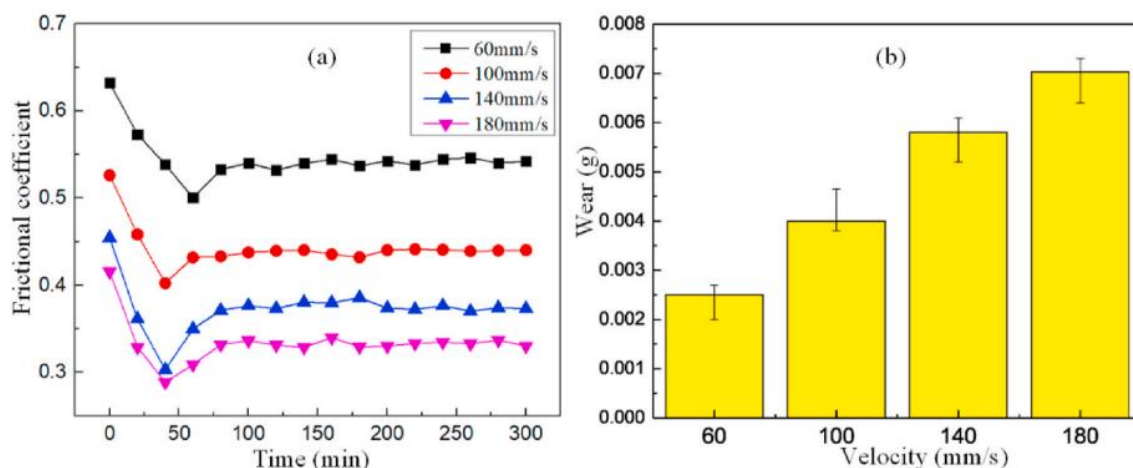
2.5.7 The friction and wear mechanism of O-rings in magnetorheological damper: Numerical and experimental study

Tato práce [31] se velmi rozsáhle věnuje problému opotřebení těsnících kroužků v MR tlumiči. Jedná se o klasický O kroužek z materiálu NBR, vůči ocelové pístnici. Autoři testovali COF a opotřebení polymerního těsnění na reálné konfiguraci, při rozdílných kapalinách a rychlostech pohybů.

Tato práce se dá rozdělit na dvě části, kdy v první části se autoři věnovali tvorbě matematického modelu, který popisuje tribologické vlastnosti tohoto kontaktu. Tento model byl poté podroben srovnání s naměřenými hodnotami získanými z reálného experimentu.

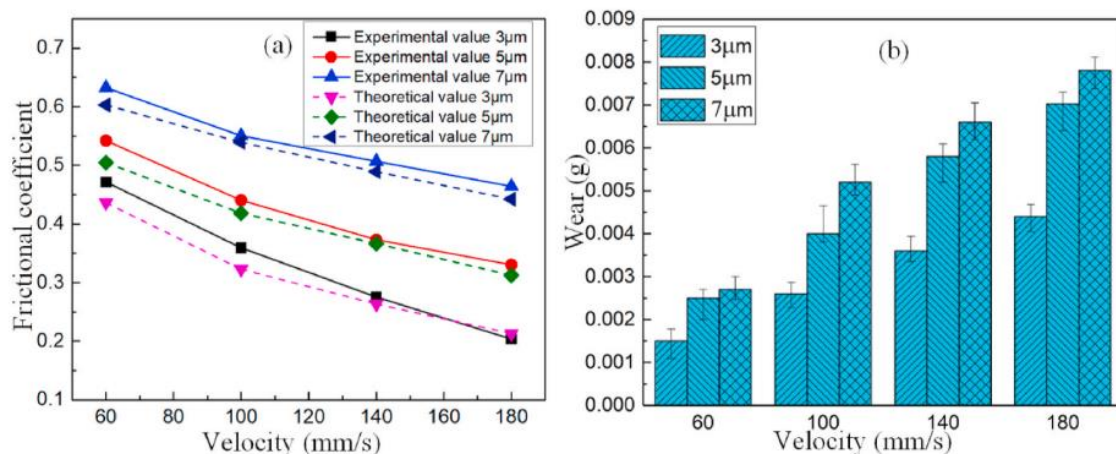
Samotný experiment se zabýval zkoumáním opotřebení O kroužku na reálné konfiguraci, tzn. O kroužek je nasazen na pístnici, která se vůči kroužku pohybuje lineárně vratným pohybem o velikosti 100 mm. Rychlost pohybu byla měněna dle experimentů (obr. 2-23). Opotřebení bylo vyhodnoceno pomocí změření hmotnostního úbytku těsnícího elementu po 300 minutách provozu. Zajímavá byla metoda vyhodnocení COF. Jeden tenzometr byl připevněn na pístnici v axiálním směru a pro zjištění normálové síly byl použit tlakový sensor nalepený na povrchu pístnice.

Jako první test, který byl autory proveden, byl test vlivu rychlosti pohybu pístnice na změnu tribologických vlastností. Test byl proveden s částicemi o velikosti 5 μm a koncentraci 70 %. Byly zkoumány 4 rychlosti a bylo zjištěno, že se zvyšující se rychlostí (a také dráhou pozn.) roste opotřebení, ale naopak klesá COF (obr. 2-23).



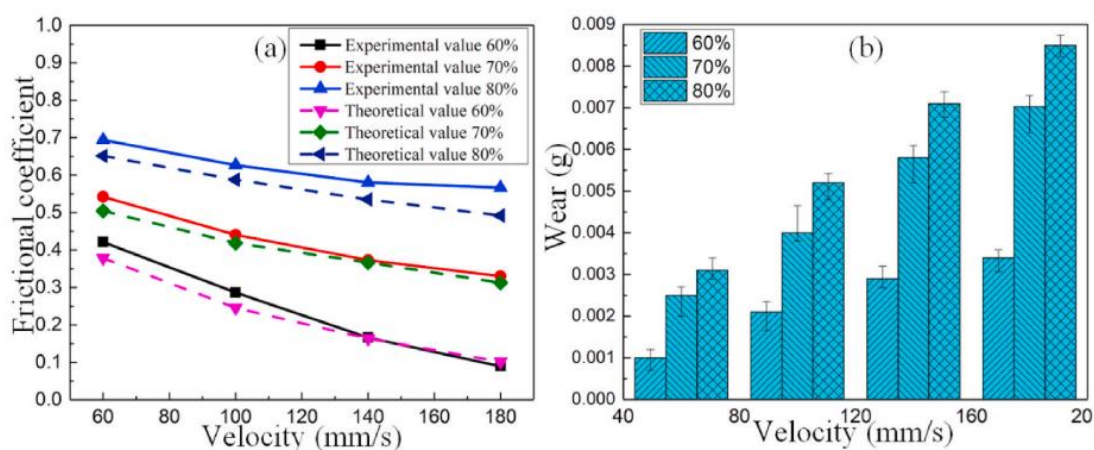
Obr. 2-23 vlevo: závislost velikosti COF v čase na rychlosti, vpravo: opotřebení v závislosti na rychlosti [31]

Další test zkoumal vliv velikosti částic na opotřebení a COF. Čím větší částice byly v kapalině, tím větší bylo opotřebení i koeficient tření. Stejně jako u předchozího měření byla hmotnostní koncentrace částic 70 %. Dále byly tyto hodnoty porovnány s vypočtenými hodnotami (obr. 2-24).



Obr. 2-24 vlevo: vliv rychlosti a velikosti částic na COF, vpravo: vliv částic a rychlosti na opotřebení [31]

Posledním testem byla zkoumána koncentrace částic a její vliv na již zmíněné vlastnosti. Byla zkoumána hmotnostní koncentrace částic 60 %, 70 % a 80 %, což znamená objemový podíl částic 13,2, 19,5 a 29 %. Zde se ukázalo, že se zvyšující se koncentrací se zvyšují koeficienty opotřebení a velikost opotřebení.



Obr. 2-25 vlevo: vliv rychlosti a koncentrace částic na COF, vpravo: vliv koncentrace a rychlosti na opotřebení [31]

3 ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE

Opotřebení funkčních kontaktů je komplexní záležitost závislá na mnoha parametrech. Jde o parametry kinematické, dynamické, povrchu či prostředí. Právě prostředí kontaktu je to, co odlišuje MR tlumič od klasického. Hlavním činidlem opotřebení je zde MR kapalina, která je vysoce abrazivní. S touto kapalinou se do kontaktu dostávají MR částice, které vysokou zvyšují three-body abrazi v kontaktu.

Některé faktory opotřebení se mění poměrně těžko, např. rychlost, nebo tlaky, protože celková konstrukce stroje to neumožňuje. Ovšem lze zasáhnout přímo do tlumiče a změnit použité materiály, protože správná materiálová dvojice je klíčová pro redukci opotřebení.

3.1 Analýza opotřebení

MR kapaliny způsobují, jakožto suspenze oleje a železných částic, vysoké opotřebení povrchů, se kterými jsou ve styku. O to více to platí, jedná-li se o styk dvou povrchů. V takovém případě dochází k abraznímu módu three-body, kdy jsou mezi povrchy přítomny abrazivní částice.

Mechanismus a režim opotřebení není pro kontakty s MR kapalinou úplně popsán. Dá se předpokládat, že režim opotřebení bude závislý na mnoha faktorech, z nichž mezi faktory kapalin patří koncentrace částic, tvrdost částic, tvar částic či použití aditiv, povrchy se podílejí těmito faktory: materiál, tvrdost, či jejich struktura a poté jsou podmínky provozu, jako rychlosti, zátěžná síla, či režimy mazání.

Je popsáno spousta mechanismů opotřebení. V hierarchii mechanismů opotřebení není úplně jasno, jelikož každý autor má na problematiku jiný pohled. Dá se předpokládat, že v MR tlumiči bude docházet hlavně k abrazi a k abrazivní erozi. Abraze ve styku pin-destička může být three body, kdy pin zatlačí na abrazivní částici k destičce a samotná částice odebere materiál, či two body abrazi, kdy pin vytlačí všechnu MR kapalinu z kontaktu a sám bude abrazivně působit na destičku.

Velikost částic, je jedním z faktorů abrazivity suspenzí. Ty se vzrůstající velikostí stávají více abrazivní, protože si zachovávají větší hybnost a snadněji narušují mazací film. **Tvrdost materiálu** je také důležitá. Gahr [20] popsal, že při poměru tvrdosti částice a materiálu větší než 1 prudce narůstá hodnota opotřebení. Vliv absolutní tvrdosti materiálu je také důležitý. Alespoň pro kovové materiály. Bronzy vykazovaly nejmenší životnost, naopak vysoce legované oceli odolávaly opotřebení nejlépe (tvrdší materiály mají nižší poměr tvrdosti částice a materiálu).

Fowler [22] zkoumal **vliv tvrdosti částic**, kdy nejtvrdší částice působí nejagresivněji na funkční povrch (opět vliv poměru tvrdostí). Vliv má i **tvar abrazivních částic**. Téměř kulaté částice byly méně agresivní než částice méně pravidelných tvarů. Je nutné připomenout, že zkoumané částice měly nejmenší tvarový poměr 0,4 (poměr nejmenšího a největšího rádia – dokonalé sférická částice má tento poměr roven 1). I to znamená, že částice je pořád poměrně dostatečně zaoblená. Z těchto článků se dá usoudit, že ideální částice by měla být kulová, z měkkého materiálu a co nejmenší. **Vliv koncentraci částic v MR kapalině** na opotřebení popisuje kapitola 2.4.8. Tam autoři přišli k zajímavému zjištění. Pro kontakt dvou kovů nejprve abrazivita narůstá se zvyšující se koncentrací částic, po překročení určité hranice ovšem opotřebení klesá, a to poměrně výrazně. Autoři se domnívají, že je to tím, částice vytvoří v kontaktu vrstvu, která poté chrání samotný povrch před abrazí.

V kapitolách 2.5.5 a 2.5.6 zkoumali autoři [28, 29] odolnost PTFE a jeho modifikací vůči opotřebení. V obou pracích přišli na to, že nejlépe odolává opotřebení PTFE kombinovaný s jiným materiálem. Nejlépe vyšel z měření kompozit PTFE a uhlíkových vláken. Naopak samotné PTFE, ačkoliv vyniká nejlepšími kluznými vlastnostmi z daných modifikací, je co se týká odolností opotřebení nejhorší.

Iyengar [25] zjistil, že opotřebení elastomerových komponent prudce roste při použití MR kapaliny. Také zjistil, že polyuretanová těsnění jsou různě náchylná na opotřebení MR kapalinami. Bohužel autoři nezveřejnili, o jaký materiál se přesně jedná, zřejmě z důvodu, že toto know-how patří buď firmě GM nebo Delphi, které je používají ve svých řešeních MR tlumiče.

Wang [31] ve své rozsáhlé práci zkoumal různé vlastnosti kapalin a kinematiky na opotřebení. Závislost opotřebení na rychlosti je poněkud zavádějící, protože se zvyšující se se rychlostí roste i vzdálenost, kterou urazí pístnice, a stejně jako počet slip stick efektů, které jsou taky velmi důležité ve vzniku opotřebení. Vliv velikosti částic je podobný, jako v práci Chotěbořského [21]. Naopak vliv koncentrace je opačný, než jaký vyzkoumal Leung [23].

3.2 Analýza kritických míst z hlediska opotřebení v MR tlumiči

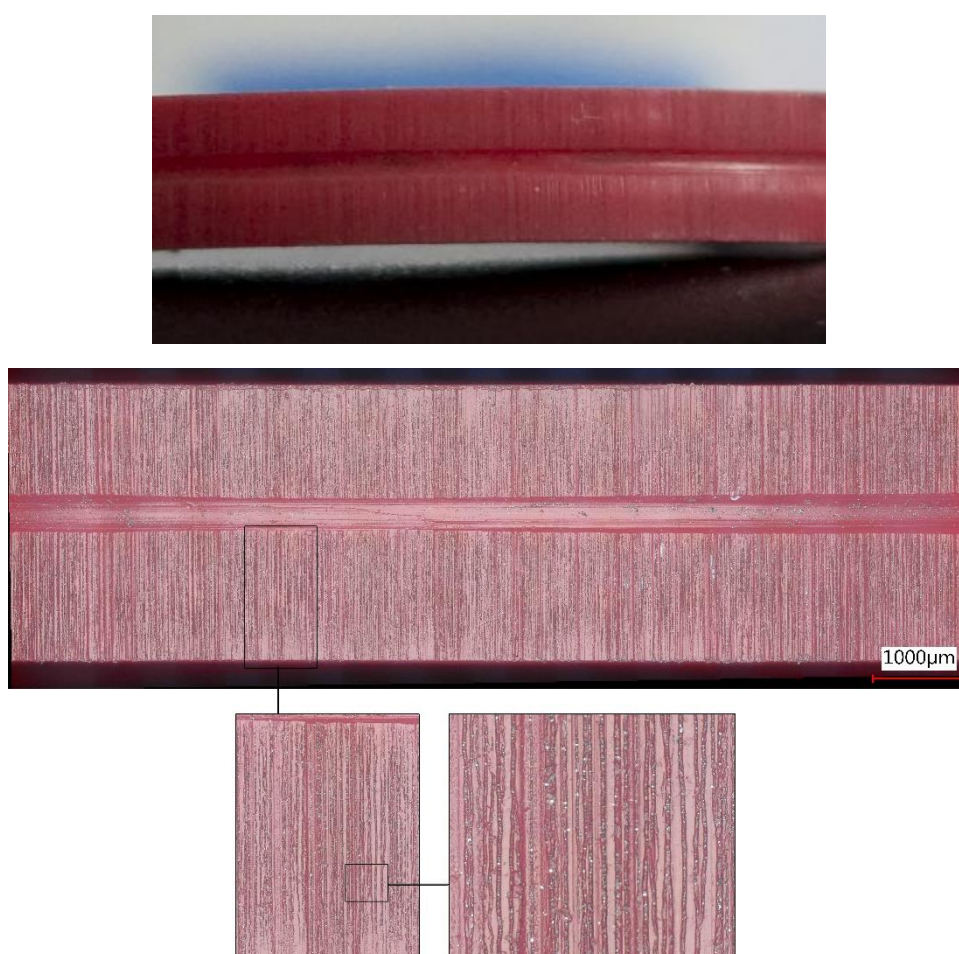
V tradiční konstrukci MR tlumiče je možné nalézt několik významných tribologických dvojic:

- Vedení pístnice (ocel x [teflon, ocel, bronz])
- Těsnění pístnice (ocel x [teflon, polyuretan, NBR...])
- Vedení pístové skupiny (ocel/dural x [ocel, bronz, teflon])

- Těsnění plovacího pístu (ocel/ dural x [polyuretan, teflon, NBR, ..])
- Vedení plovacího pístu (ocel/ dural x [teflon, materiál vodících pásek])

Z hlediska dlouhodobé funkce MR tlumiče je nejzásadnější těsnění pístnice a těsnění plovacího pístu (obr. 3-1). Z předchozích experimentů provedených na reálné konstrukci na UK vychází, že opotřebení těsnění je v MR tlumiči enormní a závislé na celé řadě parametrů. Z informací zjištěných dle rešerše nelze jednoznačně navrhnout nejvhodnější materiálovou dvojici, jelikož zvažované materiály nebyly porovnány mezi pomocí stejné metodiky.

Množství parametrů, které přímo souvisí s opotřebením těsnícího elementu je vícero: kromě již zmíněného materiálu tohoto prvku, jde o použitou MR kapalinu, tvar těsnění, povrchové úpravy pístnice atd.



Obr. 3-1 Opotřebení těsnícího kroužku

3.3 Cíle práce

Cílem této diplomové práce je porovnat odolnost polymerních materiálů vhodných pro výrobu těsnících prvků vůči opotřebení v kontaktu s MR kapalinou.

Dílčí cíle:

- návrh metodiky testování,
- konstrukční řešení a výroba nové hlavy pro Tribometr Bruker UMT,
- návrh a výroba testovacích vzorků z polymerních materiálů,
- porovnání abrazivity komerčních v MR kapalin vůči těsnění,
- porovnání abrazivity nosné kapaliny a MR kapaliny bez aditiv vůči těsnění,
- ověření abrazivity MR kapalin vůči kovovým částem tlumiče,
- výběr materiálu pro těsnění.

3.4 Vědecké otázky a hypotézy

Q1: Jaký vliv má koncentrace MR částic na opotřebení polymerních materiálů?

A1: Z rešerše vyplývá [23], že abrazivita MR kapalin vůči ocelovému bloku není úměrná koncentraci MR částic a v případě vysokých koncentrací MR částic v kapalině mírně klesá. Proto se dá očekávat, že tomu bude stejně i v případě polymerních materiálů.

Q2: Jaký polymerní materiál bude vykazovat nejmenší opotřebení v kontaktu s MR kapalinou?

A2: Ze zkoumaných materiálů by měl pro vedení nejlépe odolávat teflonový materiál. Pro těsnící prvky není známé porovnání materiálů mezi sebou, ale vzhledem k tomu, že firma GM používá pro těsnění svých tlumičů nějakou modifikaci polyuretanu [25], je zde předpoklad, že nějaká modifikace polyuretanu bude lepší, než jiné druhy materiálů těsnících prvků.

Q3: Částice v MR kapalině mají kulový tvar. Vlivem opotřebení samotné MR kapaliny při funkci MR zařízení se jejich tvar výrazně mění a liší se od ideálního kulového tvaru. Naroste opotřebení s nekulovými částicemi v MR kapalině?

A3: Dle práce Fowlera [22] by se změnou tvaru abrazivní částice mělo docházet ke zvýšení abrazivity. Ovšem, je-li změna tvaru dosažena pomocí obrušování částice, je pravděpodobné, že se zároveň zmenšila velikost abrazivní částice, a tím se i snížila její abrazivita, jak naměřil Chodunsky. Protože tyto dva procesy se navzájem ruší, nemělo by opotřebení v průběhu času, kdy se mění tvar částic, narůstat.

4 MATERIÁL A METODY

4.1 Metodika testování

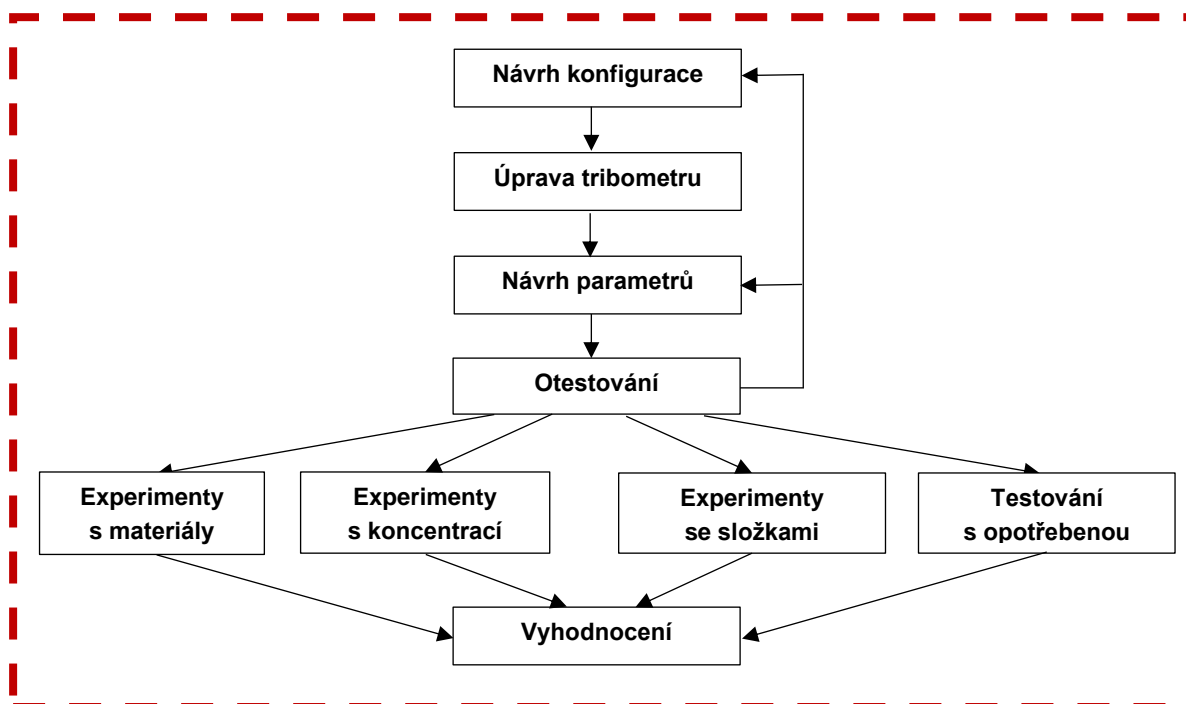
Výzkum opotřebení, porovnání abrazivity kapalin a odolnosti vůči abrazi zmíněných materiálů je možné provést přímo na MR tlumiči, ovšem takové testování je značně náročné na materiál a čas. V podstatě odpovídá délce životnosti tlumiče, a to je nepřijatelné. Proto je nutné provést zrychlený test opotřebení, při kterém sice výsledky nebudou odpovídat reálnému opotřebení, ale pro porovnání zmíněných vlastností je to dostatečné. Aby ovšem zrychlený testovací proces vydal relevantní výsledky, je nutné zvolit vhodné parametry tohoto testu a stabilitu testovacího procesu poté experimentálně ověřit. Až poté, když je proces shledán stabilním, je možné přistoupit k samotným testům. Je tedy nutné se detailně zabývat metodikou testování.

Testy měly za úkol porovnat 4 různé parametry a jejich vliv na životnost těsnících prvků tlumiče. Prvním parametrem, který bude zkoumán, je vliv materiálu těsnící manžety, resp. jeho odolnosti vůči abrazivnímu prostředí.

Druhým parametrem je vliv koncentrace feromagnetických částic v MR kapalině. Tento vliv bude porovnáván na komerčně dostupných kapalinách od společnosti LORD, konkrétně jde o kapaliny MRF-122EG (22 % vol. částic), MRF-132DG (32 % vol. částic) a MRF-140CG (40 % vol. částic).

Dalšími testy byl posouzen vliv opotřebení kapaliny na životnost těsnění a také posouzení vlivu jednotlivých komponent (základová kapalina, částice, aditiva) MR kapalin na opotřebení.

Zjednodušený postup testování opotřebení MR kapalin je zaznačen v schématu na obrázku (obr. 4.1.).



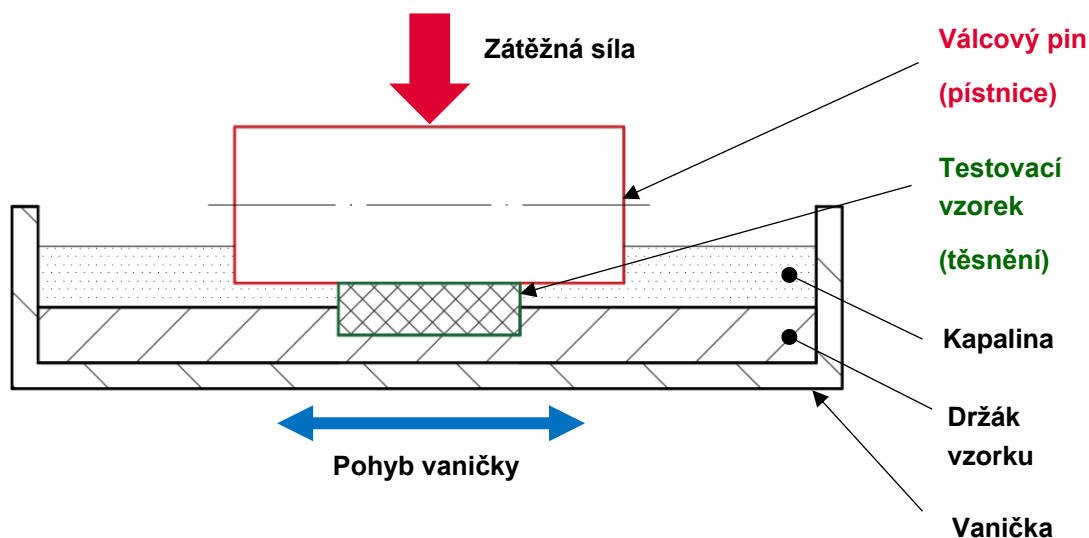
Obr. 4-1 Schéma práce

4.2 Konfigurace testu

Test bude probíhat v konfiguraci podobné pin-on-flat, dle normy ASTM G133 [32]. Tato konfigurace nejlépe vystihuje kinematiku uvnitř tlumiče – pístnice v tlumiči se také pohybuje recipročně. To znamená, že rychlost pinu, stejně jako pístnice, není konstantní po celé délce pohybu, a to především v bodech zvratu. Metodika testu je ovšem od normy ASTM 133 odlišena především tvarem pinu. Pin klasického tvaru je nahrazen válcovitým pinem stejně jako v pracích, které se zabývaly životností těsnících elementů v tlumiči [23, 26]. Jako podélný pin byl zvolen ložiskový váleček. Tuto konfigurace byla také použita v práci Bae a Iyengar [25, 26].

Ačkoliv kinematika tlumiče není v pracovním cyklu konstantní, autoři prací zmíněných v kapitole 2.5 testovali opotřebení materiálů při konstantních dynamických parametrech. (když nepočítáme změnu rychlosti při samotném cyklickém pohybu, ale ta je taky stálá). Pro porovnání odolnosti materiálu vůči abrazi je to však dostatečné. Z tohoto důvodu byly zvoleny v této práci také jedny dynamické parametry.

Testovací vzorek z polymerního materiálu je ve formě bloku o velikostech 25 x 10 x 2 mm, který je uchycen do vaničky pomocí přípravku tak, že je orientován napříč směru pohybu pinu. Celý testovaný kontakt je ponořen do vybrané MR kapaliny či oleje. Tím je simulováno zaplavení těsnění z jedné strany zkoumanou kapalinou. Schéma konfigurace testu na obrázku níže (obr. 4-2).



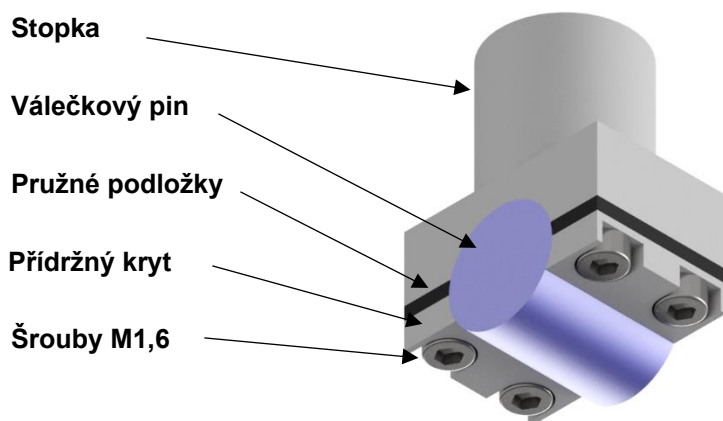
Obr. 4-2 Schéma navrhované konfigurace (zelená barva vzorek, červená barva pin)

Na první pohled se může zdát, že nekonformní kontakt pinu a pryžového vzorku nemá dostatečnou styčnou plochu proto, aby se dostaly MR částice přímo do kontaktu a způsobovaly tak abrazivní opotřebení. Ukázalo se ovšem, že po záběhu je šířka drážky v řádech milimetrů, což je o 3 řady více, než je velikost částic, což by mělo být dostatečné proto, aby částice měly možnost působit v kontaktu a nebyly tak vytlačeny bokem drážky ven.

4.2.1 Konstrukce hlavy tribometru

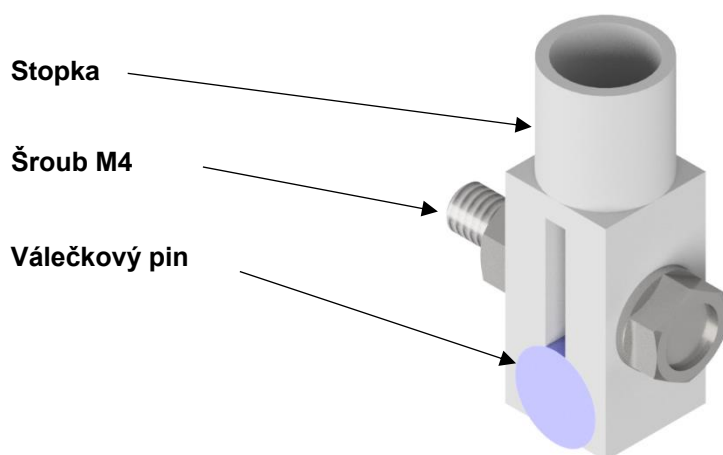
Protože laboratoř Tribologie FSI VUT nemá vhodný nástavec pro uchycení pinu do tribometru Bruker, je nutné ho navrhnout, vyrobit a otestovat. Byly navrženy dva koncepty uchycení pinu, které se liší způsobem uchycení pinu. Obrábění ložiskového válečku je poměrně obtížné, vzhledem k jeho pevnosti a tvrdosti, byly koncepty navrženy s ohledem na použití válečku bez toho, aby musel být jakkoliv upravován.

První koncept (obr. 4-3) spočívá v tom, že se ložiskový váleček upne do těla držáku pomocí krytu, který je přes pružnou podložku ze spodu přišroubovaný k tělu držáku (obr. 4-3). Z druhé strany těla je uchycená stopka, která slouží k upnutí do objímky měřící hlavy.



Obr. 4-3 Koncept upnutí pinu č. 1

V druhém konceptu je pin uchycen do drážky v těle držáku. Drážka má v sobě vybrání pro umístění válečku tak, aby váleček vyčníval části válcové plochy ven. Drážka je stažena jedním šroubem M6 a tím je pin chycen v pevné poloze. Držák je opět uchycen v tribometru pomocí stopky (obr. 4-4).



Obr. 4-4 Koncept uchycení č. 2

Pro realizaci byl vybrán koncept č. 2, který oproti prvnímu konceptu je jednodušejší výrobitelný, menší a nevyžaduje šrouby ze spodu, které by musely být zapuštěny, aby neinterferovaly s podložkou nebo vzorkem. Dalším problém předchozí koncepce by byla výroba malých závitových děr. Nevýhoda tohoto konceptu je, že samotné uložení válečku nemusí být tak tuhé, z důvodu umístění utahovacího šroubu nad místem kontaktu těla s válečkem.

4.2.2 Návrh kinematických a dynamických podmínek testu

Obvyklá pístová rychlost MR tlumiče se pohybuje v rozmezí od 0.05 m/s do 0.5 m/s. Nejčastější pístové rychlosti se dle Kasprzaka [33] pohybují okolo 0.05 až 0.2 m/s. V automobilním MR tlumiči jsou maximální zdvihy až kolem 100 – 150 mm. Jaký je obvyklý pracovní zdvih není běžně zdokumentováno, ovšem testování tlumičů dle metodiky EUSAMA pracuje se zdvihem 6 mm. Z toho usuzují, že průměrný zdvih tlumiče bude oscilovat kolem této hodnoty.

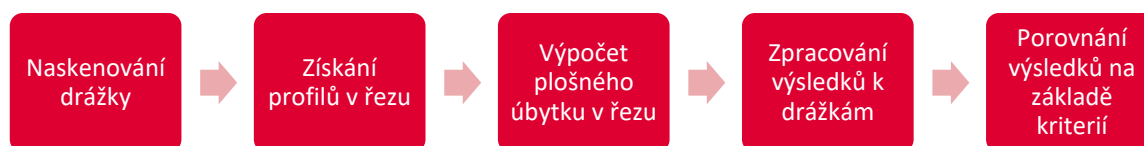
Kontaktní tlak mezi těsněním a pístnicí je poměrně komplikované stanovit. Bude se vycházet z jednoduché úvahy, že třecí síla těsnění v MR tlumiči s průměrem pístnice 12 mm je 30 N (měření již vyvinutého tlumiče na FSI VUT). Součinitel tření byl odhadnut na 0.2 až 0.3. To znamená, že normálová síla by se měla pohybovat přibližně mezi 50 – 100 N. To koresponduje i s publikací od Iyengara a kol. [25], kde byla použita síla 80 N, při velmi podobném styku obou těles.

Tyto hodnoty budou dále ověřeny v kapitole 5.2.1, kde jsou parametry porovnány a následně zjištěny ty nejvhodnější pro test.

Byla zvolena testovací frekvence 10 Hz a velikost amplitudy pohybu 3,75 mm. Frekvence 10 Hz byla zvolena z důvodu urychlení testů. To odpovídá střední pístové rychlosti 0,15 m/s, která leží v oblasti obvyklé pístové rychlosti v MR tlumiči. Množství cyklů bylo stanoveno na 2000, 40000 a 80000. Různé počty cyklů byly zvoleny proto, aby byla možnost získat i informaci o průběhu opotřebení, navíc se ukázalo, že během prvních 1000 cyklů dochází k záběhu vzorku, a tudíž opotřebení z této části není relevantní.

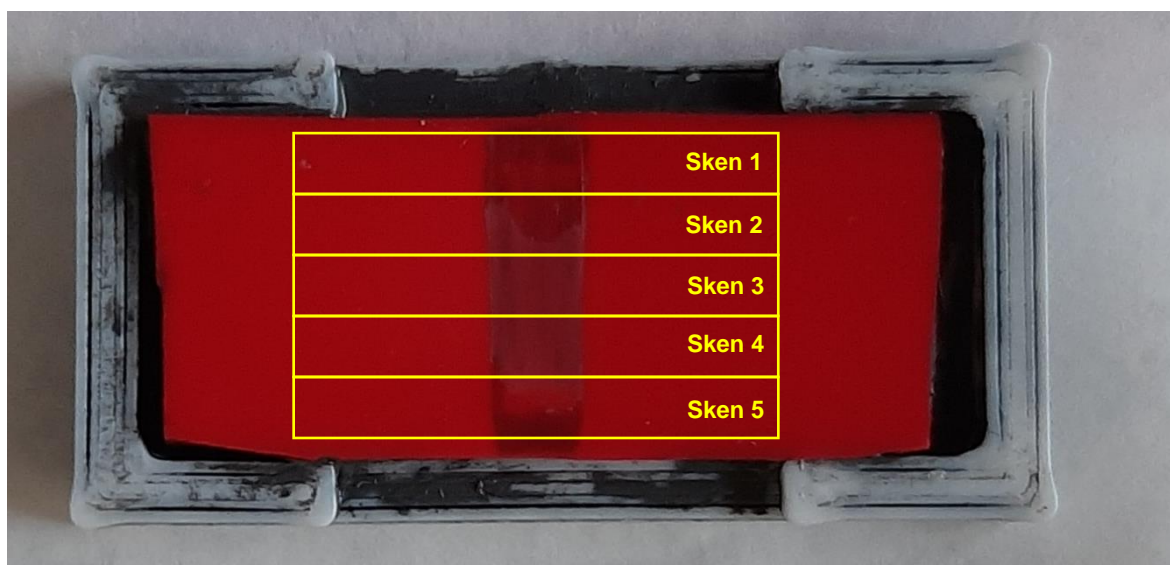
4.2.3 Metodika vyhodnocení opotřebení

Opotřebení bude hodnoceno podle množství odebraného materiálu ve vzniklé drážce z naskenovaných profilů. Poté byly velikosti opotřebení porovnány mezi sebou (obr. 4-5). Toto řešení se již osvědčilo v moji dřívější práci [34] a používal ho pro vyhodnocení Iyengar či Bae [25, 26]. Tento způsob vyhodnocení je také velmi podobný tomu, jak je předepsán v normě ASTM G133.



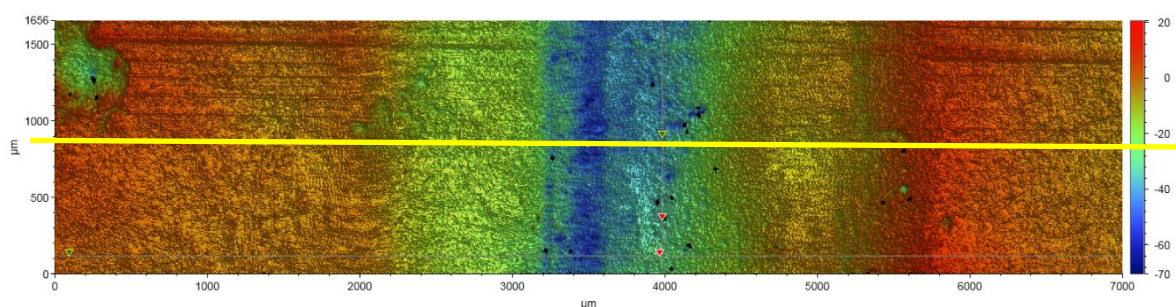
Obr. 4-5 Schéma postupu vyhodnocení

Měření odebraného materiálu proběhlo na profilometru Bruker Contour GT-X. Tribometr Bruker Contour umožňuje spojovat jednotlivé obrazy k sobě pomocí funkce stitching, a to v obou směrech. Umožňuje tak naskenovat drážku a její okolí celé. Naskenování okolí je důležité kvůli získání referenční nulové hladiny, od které se vypočítává samotné opotřebení.



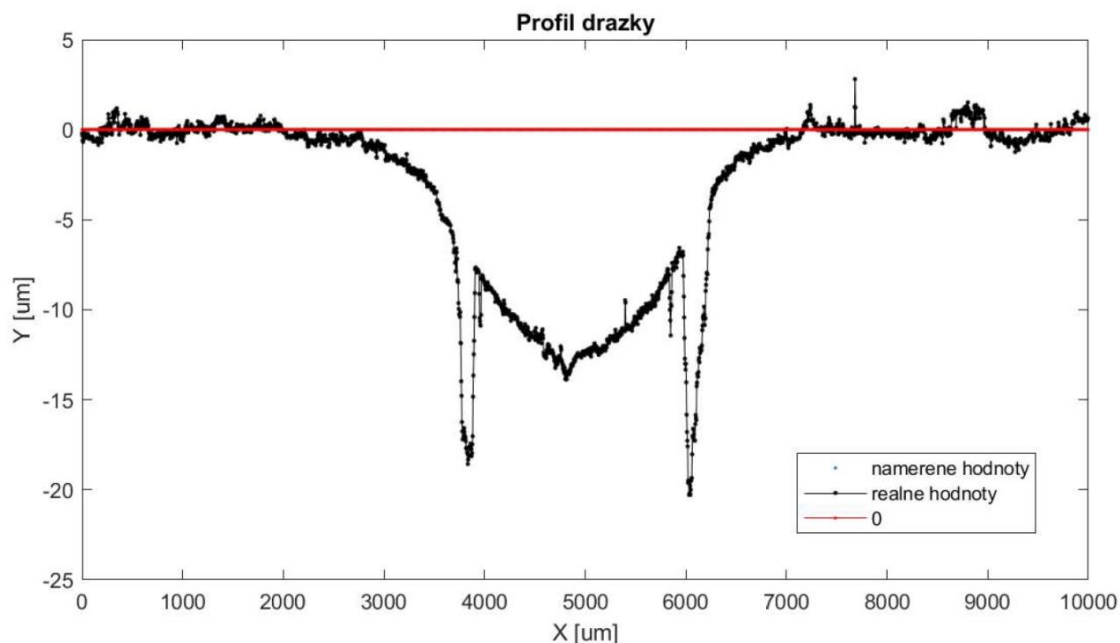
Obr. 4-6 Opotřeбенý vzorek, žlutě skeny drážky (5 skenů)

Protože je však samotné skenování poměrně zdlouhavé a někdy mohly nastat chyby, které by byly časově náročné, bylo přistoupeno k postupnému skenování drážky a použití funkce stitching pouze v jednom směru (obr. 4-6). Bylo tak méně časově náročné opravit chyby měření. Protože velikost skenu ve směru drážky byla necelých 2 mm, bylo použito 5 skenování pro získání většiny profilu drážky.



Obr. 4-7 Jeden sken drážky, žlutě řez

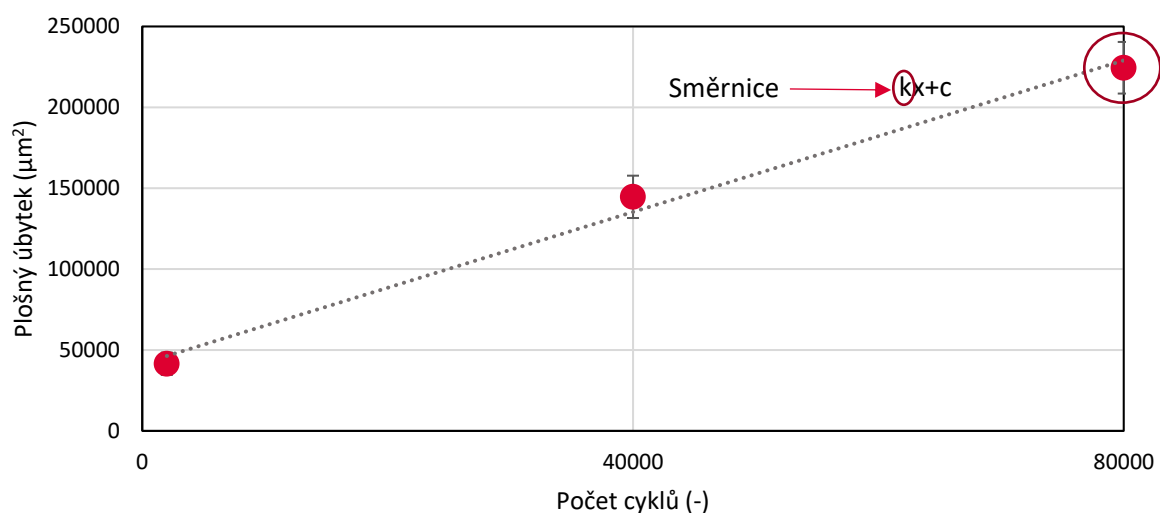
Úbytek materiálu byl vyhodnocen ze získaných profilů řezů (obr. 4-7), kterých bylo na jedné drážce provedeno 5. Při testech nedocházelo k adhezivnímu vytrhávání materiálu ani nerovnoměrné abrazi, bylo toto množství řezů vyhodnoceno jako dostatečné.



Obr. 4-8 Příklad profilu drážky (červeně nulová hodnota)

Profil těchto řezů byl následně exportován a v programu MATLAB byl pomocí lichoběžníkové integrační metody vypočten úbytek materiálu v profilu (obr. 4-8). Tato metoda vyhodnocení ovšem vyhodnocuje pouze čistě odebraný materiál z drážky, pokud by tam docházelo k přetvoření materiálu a tvorbě valů kolem drážky, tato metoda to nebude schopna zachytit, což ovšem nevadí, protože tvarová konfigurace styku pístnice-manžeta nedovoluje vytlačení materiálu mimo kontakt. Získání opotřebení jedné drážky proběhlo zprůměrováním plošného úbytku na řezech v jedné drážce.

Po získání opotřebení všech drážek v jedné konfiguraci byly výsledky vyneseny do grafů (obr. 4-9). Pro vyhodnocení a porovnání opotřebení byly použity dvě hodnoty. První hodnotou byla velikost opotřebení po 80000 cyklech, což je nejjednodušší forma vyhodnocení a porovnání, která ovšem v sobě zahrnuje chybu v podobě záběhu. Druhým kritériem je velikost směrnice přímky trendu (opotřebení se mimo záběh zdá být lineárně závislé na počtu cyklů). Směrnice této přímky již v sobě nezahrnuje záběh, ten je schován pouze v konstantě, která se ale nezapočítává.



Obr. 4-9 Příklad opotřebení drážky pro různý počet cyklů, popis použitých metod pro porovnání výsledků

Úbytek materiálu lze vypočítat i jednodušeji než přes Matlab funkci, a to přes vestavěnou funkci přímo v programu Vision64 (program k profilometru), který umožňuje přímo a „přesněji“ získat údaj objemového úbytku. Relativní přesnost tohoto výpočtu tkví v tom, že počítá úbytek ve všech bodech. V této práci ho však využito nebylo proto, že by docházelo ke značnému zkreslení tím, že program sám nepřesně určuje nulovou hodnotu pro měření, tudíž ta se musí ještě kalibrovat ve výpočetním systému, a to již při vypočtené hodnotě nelze. Proto k tomuto způsobu vyhodnocení nebylo nepřistoupeno.

4.2.4 Testovací vzorky

Polymerní materiály pro těsnění

Testovat se bude více možných materiálových konfigurací, které vychází z analýzy kritických míst, které se mohou vyskytnout v tlumiči. Jde o dvojice:

- ocel – PU těsnění (více druhů)
- ocel – PTFE
- ocel – SBR
- ocel – NBR

Tyto materiály jsou vhodné pro výrobu těsnících prvků a mají relativně vysokou odolnost vůči otěru, což se např. o vitonu či EPDM říct nedá [35].

Dodavatel Hennlich má v nabídce několik variant polyuretanu, o kterých tvrdí, že mají jiné tepelné okno použití, ale jinak by měly vykazovat podobné vlastnosti. Proto byly zvoleny čtyři varianty tohoto materiálu a byly porovnány s ostatními vzorky.

Použité materiály polymerního těsnění a jejich tvrdost, která by mohla naznačovat odolnost vůči abrazi, jsou uvedeny v tabulace níže:

Tab. 4-1 Testované materiály [36, 37] (*přepočten z Shore D [38])

Materiál	H-PU95FDA	H-PU55D	LT-PU	SL-PU	SBR	NBR	PTFE
Typ materiálu	Polyuretan	Polyuretan	Polyuretan	Polyuteran	Styren-butadien	Nitril-butadien	Polytetrafluor-etylén
Dodavatel	Hennlich	Hennlich	Hennlich	Hennlich	Alfa-agro	Mateza	Alfa-agro
Tvrdost (Shore A)	95	96*	96	96	70	85	95*

Magnetoreologické kapaliny od firmy LORD

V rámci diplomové práce jsou testované komerčně dostupné MR kapaliny od společnosti LORD Corporation. Tyto kapaliny jsou určeny pro univerzální použití. Jejich využití je v aplikacích, kde je MR kapalina zatěžována v smykovém či průtokovém módu. Kapaliny popsané v tabulce níže budou použity při testování vlivu koncentrace částic na opotřebení polymerních materiálů. Bohužel se pro tyto kapaliny nepodařilo dohledat přesné složení a vlastnosti jednotlivých komponent kapaliny. Je zde však předpoklad, že nosná kapalina je podobná PAO [39].

Tab. 4-2 Kapaliny firmy LORD

	MRF-122EG[40]	MRF-132DG[41]	MRF-140CG[42]
Vzhled	Tmavě šedá kapalina	Tmavě šedá kapalina	Tmavě šedá kapalina
Viskozita (40 °C)	0.042 ± 0.020 Pa.s	0.112 ± 0.020 Pa.s	0.280 ± 0.070 Pa.s
Hustota	2.28-2.48 kg/m ³	2.95-3.15 kg/m ³	3.54-3.74 kg/m ³
Hmotnostní poměr pevných částic	72 %	81 %	85,44 %
Objemový podíl částic	22 %	32 %	40 %
Teplota vzplanutí	>150 °C	>150 °C	>150 °C
Teplota použití	[-40; +130] °C	[-40; +130] °C	[-40; +130] °C

Kapalina MRC-S1L

Tato komerční kapalina je vyráběna korejskou firmou CK Materials Lab. Jedná se o MR kapalinu určenou pro použití v lineárních systémech, speciálně však v hydraulických tlumičích [43]. Z tabulky níže je možné vyčíst, že tato kapalina je velmi podobná kapalině LORD MRF-132DG. Z toho důvodu je vhodné porovnat přístupy obou výrobců k použité aditivaci kapalin, která by měla mít vliv na velikost abrazivního opotřebení. Použití této kapaliny se jeví perspektivně, protože že kapalina vykazuje smykově řídňovací chování, a tedy při obvyklých smykových spádech v MR zařízeních se jeví výhodnější z hlediska dynamického rozsahu.

Tab. 4-3 Parametry kapaliny MRC S1L (*dopočtená hodnota)

MRC-S1L [43]	
Vzhled	Tmavě šedá kapalina
Viskozita (40 °C)	$0.106 \pm 0.020 \text{ Pa}\cdot\text{s}$
Hustota	$2.75\text{-}2.95 \text{ kg/m}^3$
Hmotnostní poměr pevných částic	78 %*
Objemový podíl částic	30 %
Teplota vzplanutí	>140 °C
Teplota použití	[-40; +140] °C

Opotřebená kapalina MRF-132DG

Jedná je o standartní MR kapalinu typu MRF-132DG od společnosti LORD, která je zmíněna o kapitulu výše. Tyto kapaliny jsou pravděpodobně doplněny aditivami, jež jsou aktivovány tepelným zatížením kapalin. (má zajišťovat snadné plnění nového tlumiče). Před tepelnou aktivací je kapalina „tekutá“. Po tepelné aktivaci dojde pravděpodobně k nárůstu meze toku nosného media vlivem aditiv. [To má pravděpodobně zpomalovat rychlost sedimentace MR částic (obr. 4-10).

Také se opotřebením kapaliny mění tvar feromagnetických mikročástic [44], od kterých se odlupují vrstvy materiálů a částice získávají menší, ale za to méně kulový tvar, který by měl být více abrazivní (kap. 2.4.7). U nové MR kapaliny se předpokládá dokonale kulový tvar částic, který je dán způsobem výroby. Kapalina použitá pro testy byla zatížena v MR tlumiči a předpokládá se její „Life dissipation energy“ (LDE), v překladu množství disipované energie v jednotkovém objemu kapaliny, na cca $2 \cdot 10^6 \text{ J/cm}^3$. To znamená, že kapalina je přibližně v 15 % až 20 % své životnosti.



Obr. 4-10 Opotřeбенá MR kapalina (malá tekutost)

Nosná kapalina MR kapaliny

Z dostupných informací se jako nosný olej MR kapaliny používají oleje na bázi silikonových olejů či polyalfaolefinů (PAO). Bohužel, stejně jako i u ostatních komponent kapalin, není známý poměr, v jakém je namíchána v komerčních kapalinách [45, 46]. V této práci je nosná kapalina složena ze 100 % PAO2.

Polyalfaolefiny jsou základovými kapalinami pro výrobu syntetických maziv. Jedná se o olej kategorie IV dle normy API. Je to bezbarvá kapalina se speciálně definovanou strukturou uhlovodíkových molekul, jsou tak schopny dosahovat lepších provozních vlastností než klasické hydraulické oleje. Tato kapalina má malou viskozitu a dobrý viskózní index. Viskozita pro nízkoviskózní PAO má poměrně vysoký rozsah, v závislosti na použitém druhu se pohybuje od cca 0,06 Pa.s až k 18 Pa.s při 40°C [47], a v případě PAO2 se pohybuje u nižší hranice výše zmíněného rozmezí (tzn. 0,06 až 0,08 Pa.s [47]).

MR kapalina bez aditiv

Pro testy vlivu opotřebení částic bez zahrnutí aditiv byla vyrobena MR kapalina jako mix částic BASF CIP HQ [48] a polyalfaolefinu PAO2 (dále označovaný jenom jako PAO).- Tyto částice mají střední hodnotu průměru okolo 2 μm , která by měla odpovídat kapalinám od společnosti LORD.

. Bylo namícháno 20 ml suspenze o objemovém podílu částic 32 % (koncentrace cca 82 hm. %). Cílem bylo porovnat tuto suspenzi s kapalinou MRF-132DG. Viskozita této suspenze byla vizuálně větší než, než kapaliny MRF-132DG a lze předpokládat, že LORD používá nějaká aditiva ovlivňující tekutost MR kapaliny nebo PAO míchá ještě s jiným druhem oleje.



Obr. 4-11 Namíchaná MR kapalina

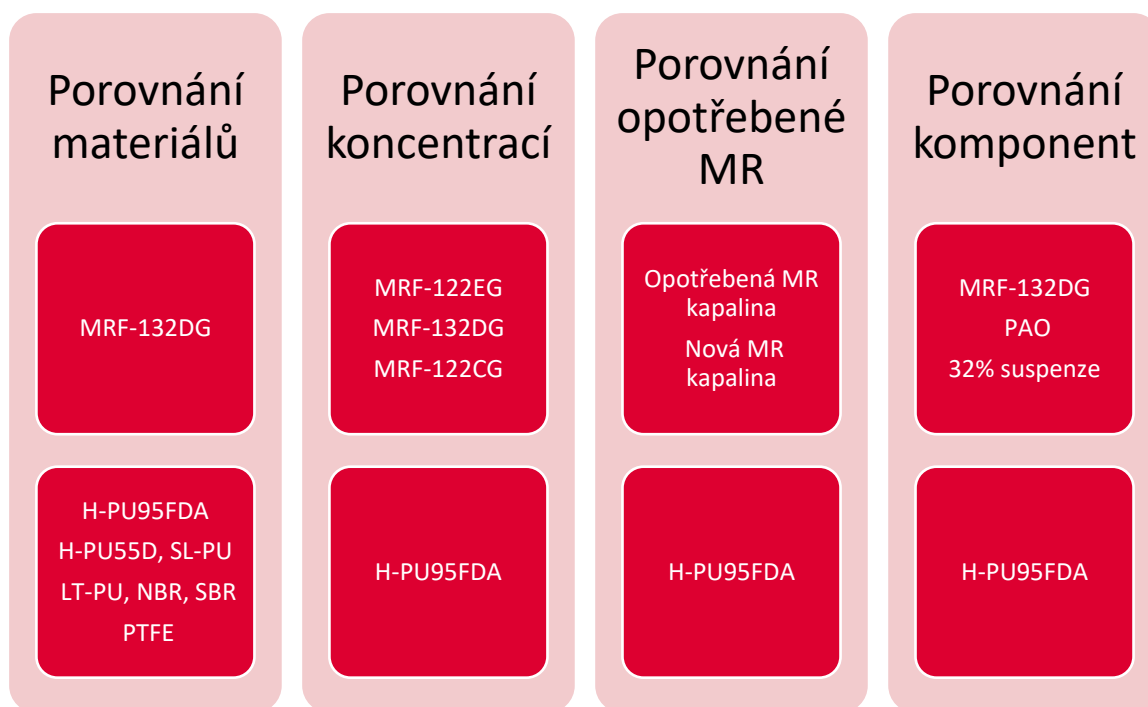
4.2.5 Plán testů

Pro zjištění, jaký materiál vhodný pro výrobu těsnění nejlépe odolává opotřebení, byly provedeny testy s různými materiálovými vzorky. V rámci toho, že se ve v práci [34] a taky v dalších testech prokázalo, že se s různými kapalinami nemění zásadně opotřebení, bylo nakonec přistoupeno pouze k porovnání různých materiálů v kapalině MRF-132DG (obr. 4-12). Tady těmito testy bylo odpovězeno na vědeckou otázku č. 2.

Dále bylo provedeno porovnání abrazivity komerčních kapalin se stejným složením a různou koncentrací MR částic (MRF-122EG, MRF-132DG, MRF-140CG) na jednom vybraném polymerním materiálu. Testy byly provedeny na materiálovém vzorku H-PU95FDA. Jako doplněk k tomuto testu bylo provedeno srovnání těchto kapalin s jinou komerční kapalinou, aby bylo zjištěno, jak moc velkou roli hraje koncentrace MR částic oproti jiným parametrům MR kapalin. Tím byla zjištěna odpověď na vědeckou otázku č. 1.

Dalšími testy byla porovnána opotřebovaná kapalina MRF-132DG s novou kapalinou na materiálovém vzorku H-PU95FDA. Tím byla zodpovězena otázka č. 3.

Dodatečně byla doměřena a porovnán vliv základních komponent MR kapalin. Jde o základovou kapalinu (PAO) a o suspenzi MR částic a základové kapaliny. Tím bude zjištěno, jak moc se může opotřebení vzorku lišit, kdy opotřebení způsobené pouze PAO by mělo sloužit jako nějaká reference minimálního opotřebení, nižší by opotřebení být nemělo, naopak použitá suspenze by měla simulovat asi nejabrazivnější variantu MR kapaliny. Schématický jsou experimenty vyobrazeny na obrázku níže (obr. 4-12).



Obr. 4-12 Schéma testovaných kombinací pro různé testy

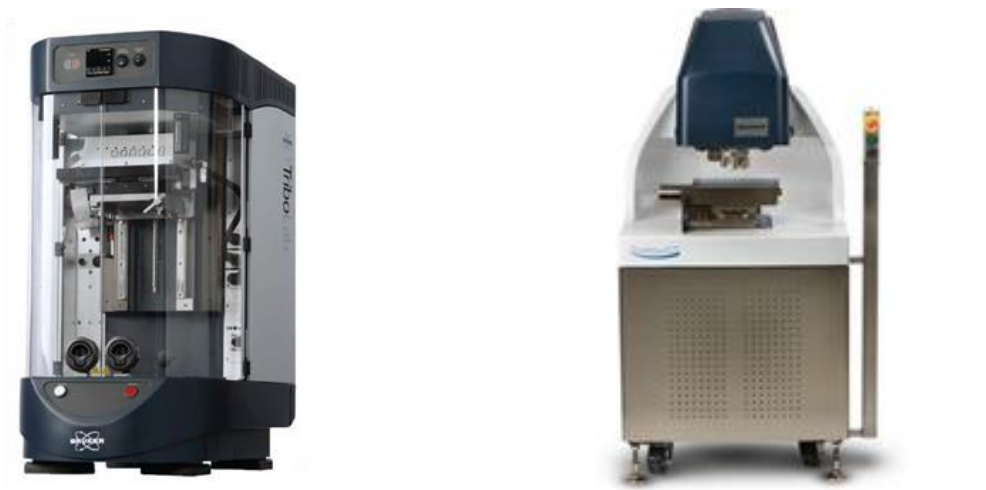
4.3 Použitá zařízení

4.3.1 Tribometr Bruker UMT Tribolab

Bruker UMT Tribolab (obr. 4-13) je univerzální tribometr [49]. Firma Bruker Corporation ho v různých modifikacích vyrábí od roku 2000. Velikost přístroje je (39.1 x 65.4 x 77.8) cm. Přístroj má rám vyroben z šedé litiny, aby konstrukce dovedla tlumit rázy vznikající při provozu. Přístroj je modulární a může být vybaven moduly pro různé druhy pohybů (lineární, reciproční, rotační). Tato variabilita umožňuje měřit v různých tribologických konfiguracích (pin-on-block, pin-on-disk, block-on-ring...)

Měřicí zařízení se skládá z dvou částí, horní a dolní. Horní hlava se skládá s přítlačné části a měřících senzorů. Tato součást je snadno zaměnitelná za jiné hlavy, aby byla zajištěna co největší flexibilita měření. Spodní část obstarává požadovaný pohon pro vzájemný pohyb vzorků a zajišťuje požadované okolní podmínky pro měření.

Kromě flexibility ve volbě konfigurace, je možno tribometr dovybavit různými doprovodnými moduly pro zajištění vhodných podmínek testu, například tepelnou komorou, vyhřívanou komorou s vlhčením vzduchu, nádobou na kapaliny. Je možno také přidat měřicí a vyhodnocovací systémy. Mohou to být: AFM mikroskop, optický digitální mikroskop, nanointender či různá čidla, měřicí silové, akustické či elektrické vlastnosti materiálu během testu.



Obr. 4-13 Tribometr Bruker UMT Triboab [49] (vlevo) a profilometr Bruker Contour GT-X [50]

4.3.2 Profilometr Bruker Contour GT-X

Profilometr Bruker Contour GT-X (obr. 4-13) je univerzální automatizovaný profilometr [51]. Zdrojem světla pro objektiv jsou 2 LED – bílé a monochromatické a na profilometru je otočný adaptér, na který je možné namontovat až 5 interferometrických objektivů. Celkové zvětšení od objektivů a čoček se pohybuje rozmezí od 0,825 do 230 a přístroj disponuje vertikálním rozlišením 0,1 nm do 10 mm. Pro zajištění přesnosti měření je celý systém vzduchově odpružen. Profilometr je ovládán skrz software Vision64, který také slouží k úpravě a vyhodnocení dat.

5 VÝSLEDKY

5.1 Konstrukce uchycení pinu a vzorku

5.1.1 Výběr pinu

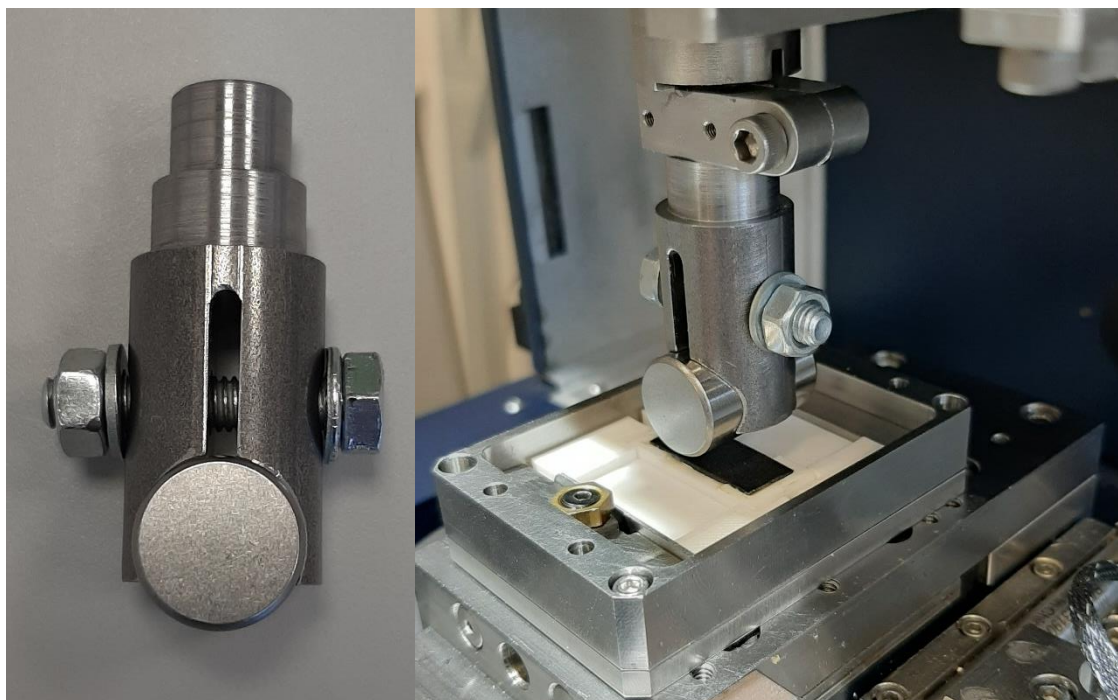
Jako pin, který je uchycen do držáku byl zvolen ložiskový váleček 16x24. Tento váleček byl vybrán na základě několika požadavků:

- délka alespoň 20 mm dlouhý, aby při testu nevyjížděl ze zkoumané oblasti,
- délka menší než 40 mm, aby se vešel do zařízení,
- průměr co nejvíce se přibližující průměru pístnice,
- vysoká tvrdost a odpovídající drsnost povrchu.

Protože by výroba pinu z nástrojové, či jiné vysokolegované oceli byla nesmírně nákladná, bylo zvoleno zakoupení ložiskových válečků. Tyto válečky jsou dodávány v mnoha velikostech, ovšem válečky či jehly jsou už v těchto velikostech poměrně drahé, proto byl i z ekonomických důvodů zvolen tento váleček.

5.1.2 Konstrukce držáku

Byl zkonstruován držák pro válcový pin (obr. 5-1) Tento držák je určen pro upnutí v měřicí hlavě tribometru Bruker Tribolab. Pro finální výrobu byl určen koncept 2, který byl rozpracován. Držák byl vyroben z klasické konstrukční oceli 11 500, která plně svými vlastnostmi vyhovuje, a protože ještě není jisté, jestli se držák nebude muset upravit, jedná se i o relativně levné řešení.

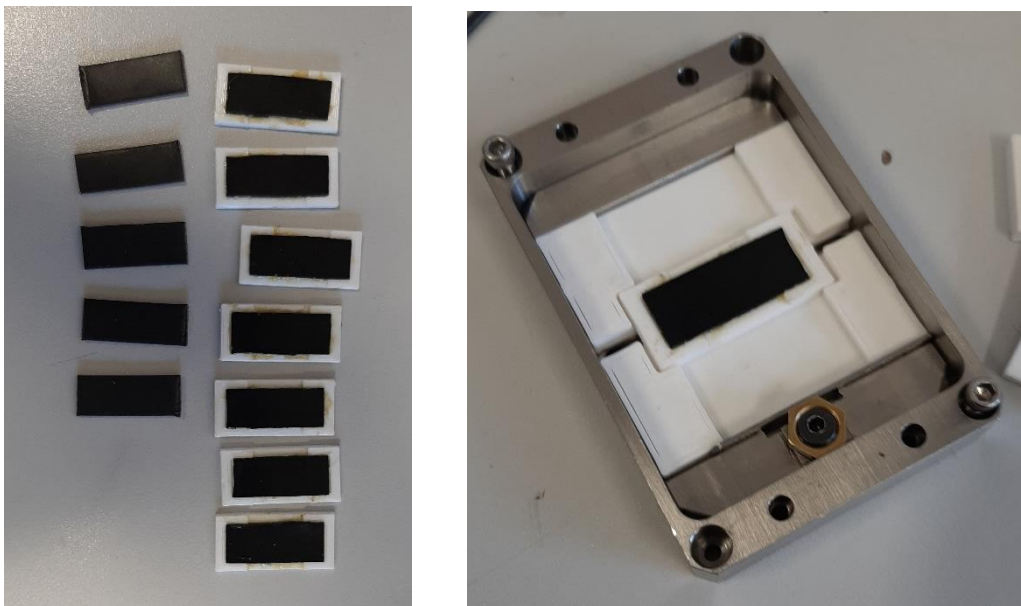


Obr. 5-1 Vlevo: Vyrobený držák pro pin (i s válcovým pinem), vpravo: pin uchycený v tribometru

Pin byl vložen do drážky, která musela být pro pevné uchycení pinu stažena šroubem. Zvolený šroub byl M6, kterým bylo možno v pevnostní třídě 8.8 dosáhnout předpětí přes 8 kN [52]. V praxi nebylo nutné dosahovat tak velkých předpětí, a proto tento šroub vyhovuje.

5.1.3 Uchycení vzorku

Testovací vzorky tak malých rozměrů nelze uchytit do standartní měřicí vaničky na tribometru Bruker. Tento problém je ještě větší u testovaných pryžových vzorku, protože ty by se při uchycení pomocí svěrné síly zdeformovaly a znehodnotily tak test. Proto bylo přistoupeno k návrhu uchycení vzorků do testovací vaničky.



Obr. 5-2 Vlevo: Vlepené vzorky z SBR a připravené vzorky, vpravo: uchycení vzorku do vaničky

Byly vyrobeny vymezovací podložky (obr. 5-2), které dokážou uchytit PTFE vzorky anebo držáky pryžových vzorků, který se následně, i se zabudovaným vzorkem uchytí mezi podložky. Tento držák je v podstatě taková plochá vanička, kdy stěny tvoří vedení po elastické vzorky, do které je vzorek vlepen pomocí lepidla vteřinového lepidla na pryžové spoje Loctite 60 sec. universal glue. Byly zkoušeny ještě chemoprénové a standartní vteřinové lepidlo a toto se ukázalo být nejvhodnější. Takto zabudovaný vzorek se následně vloží do vaničky v tribometru. Všechny části, popsané v kapitole 5.1.3 byly vyrobeny z materiálu PLA pomocí technologie FDM.

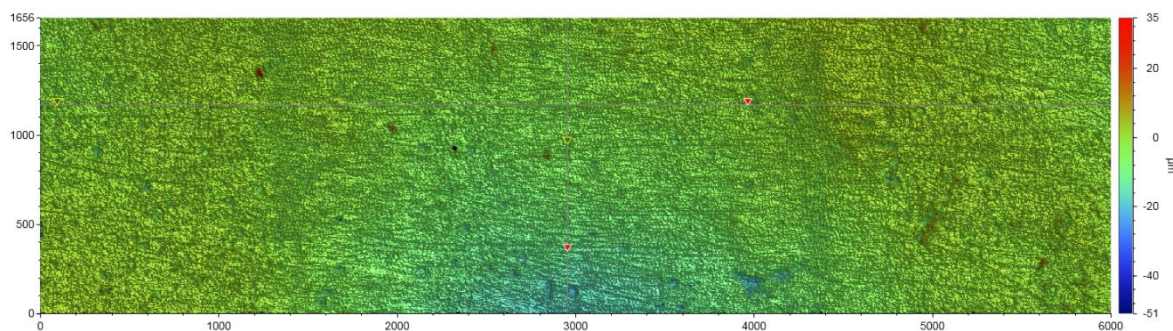
5.2 Výsledky měření abrazivity v kontaktu s polymerním materiálem

5.2.1 Testy parametrů

Pro zajištění věrohodnosti a reprodukovatelnosti výsledků bylo nutné určit a ověřit parametry testů. Pro ověření testovací metodiky byl zvolen materiál SBR. Jako první byly zvoleny parametry tak, aby korespondovaly s rozbořem dynamických parametrů v kap. 2.4.2.

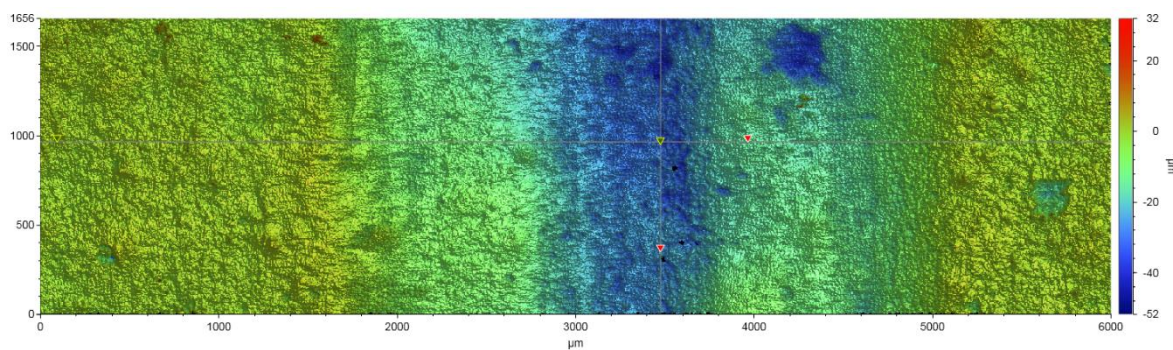
Zpočátku byly testovány parametry:

- Zátěžná síla: 50 N
- Frekvence: 5 Hz
- Amplituda: 5 mm



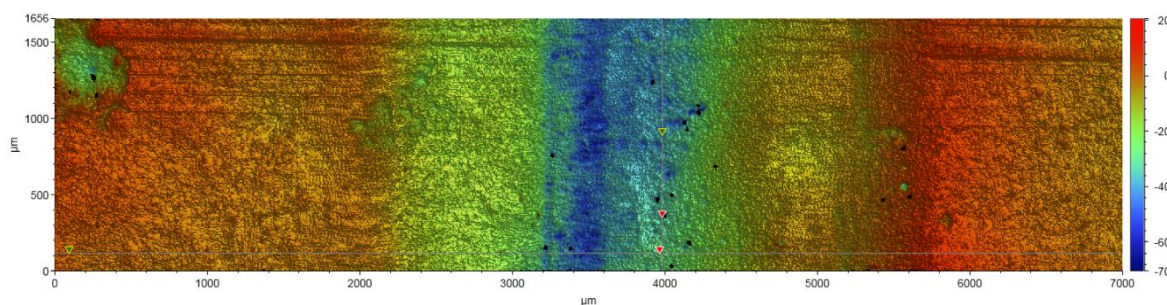
Obr. 5-3 Opotřebená drážka prvotními parametry (neměřitelné)

Tyto parametry se ukázaly být nedostatečné (obr. 5-3), protože ani po 20000 cyklech nebyla zajištěna měřitelnost. Provádět více cyklů nebylo možné z časových důvodů. Proto bylo přistoupeno ke zvětšení zátěžné síly. Ukázalo se, že koeficient tření v kontaktu se pohybuje do maxima 0,2, takže se stále jedná o hodnotu zátěžné síly v rozmezí daným dynamickým rozbohem.



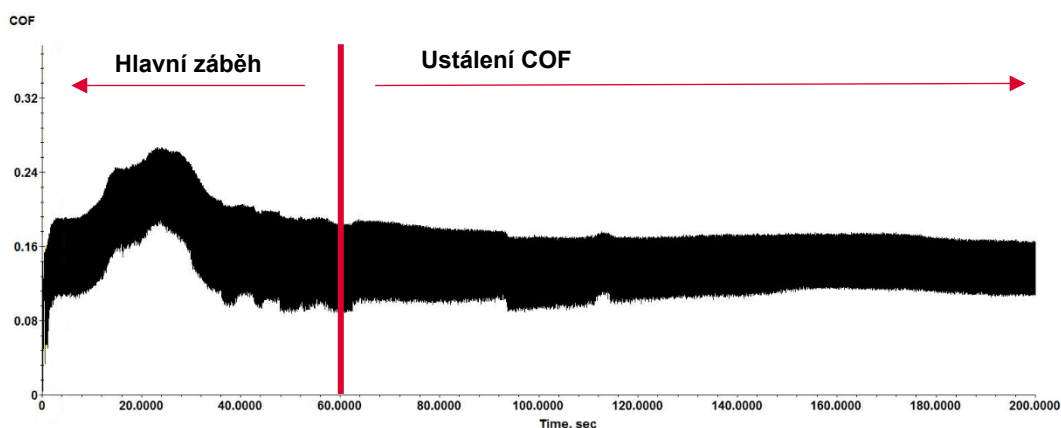
Obr. 5-4 Opotřebení drážky zvětšenou silou

Opotřebení takto způsobené již bylo měřitelné (obr. 5-4), a i poměrně dobře reprodukovatelné. Ovšem byla vyslovena hypotéza, že vzhledem k tomu, že tento test byl proveden s potenciálně nejměkčím materiálem, tak by mohly nastat problémy s měřitelností u jiných materiálů. Z tohoto důvodu byla zvětšena frekvence na 10 Hz a zvýšen počet cyklů na 80000, ale z technických důvodů snižena amplituda pohybu 3,75 mm. Vzhledem k tomu, že dle článků Lakea [53] a Fukahoriho [54] vzniká opotřebení hlavně při slip-stick efektu při rozjezdu, mělo by i tak dojít k vyššímu opotřebení. To se potvrdilo (obr. 5-5), dalším testem, a i opotřebení bylo shledáno dostatečné, proto bylo přistoupeno k dalším měřením.



Obr. 5-5 Opotřebená drážka s finálními parametry testu

Ještě byl na materiálu SBR zjišťován záběh drážky, ve kterém se mění geometrie z nekonformní na konformní a nebylo by vhodné tohle opotřebení započítávat do výsledného opotřebení. Množství záběhových cyklů bylo stanoveno na 2000. To bylo určeno především z koeficientu tření, kdy asi po 1000 cyklech došlo k ustálení této hodnoty, a tudíž zde byl předpoklad, že již došlo k záběhu (obr. 5-6).



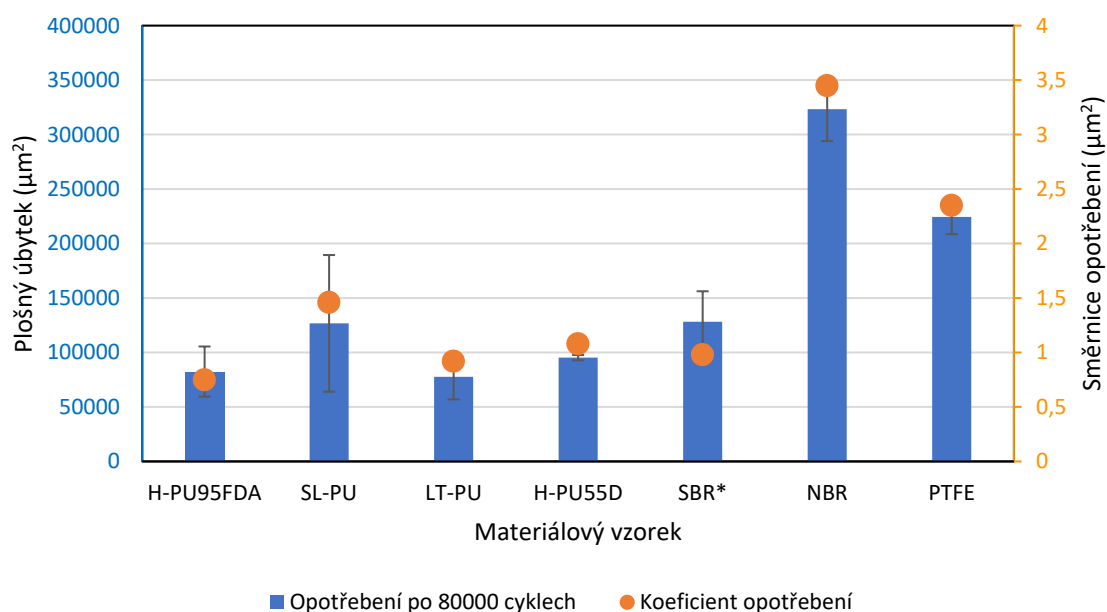
Obr. 5-6 Graf COF na času při záběhu (relativně vysoký rozptyl z důvodu slip-stick efektu)

5.2.2 Testy odolností materiálů

Výsledky testování odolností polymerních materiálů vhodných pro výrobu těsnění jsou na grafu na obr. 5-7. Z grafu je jasné patrné, že nejlépe odolávají opotřebení materiály H-PU95FDA, LT-PU, a H-PU55D, u nichž jde velikost opotřebení nazvat srovnatelnou v mezi statistické odchylky. Tím byla potvrzena hypotéza č. 1, že nejmenší opotřebení vykazují materiály na bázi PU.

Dále je možné pozorovat, že materiál SBR vykazuje také poměrně dobrou odolnost proti opotřebení, ta je však ovlivněna tloušťkou testovacího vzorku, který na rozdíl od všech ostatní byl tlustý 1 mm, oproti 2 mm u ostatních vzorků. Tím byla i zaručena vyšší tuhost vzorku a menší přilnutí válečku k materiálu, a tudíž i k menší ploše, kde docházelo k opotřebení. Výsledky SBR je tedy nutné brát s určitou rezervou. Materiál NBR, který má podobné vlastnosti, vykazuje opotřebení 3-3,5x větší než materiál H-PU95FDA v obou kritériích.

Materiál PTFE vykazoval 2x větší opotřebení než materiál H-PU95FDA, a to i přes to, že by měl vykazovat podobnou mikro tvrdost jako testované polyuretany.



Obr. 5-7 Velikost opotřebení různých materiálů v kapalině MRF-132DG

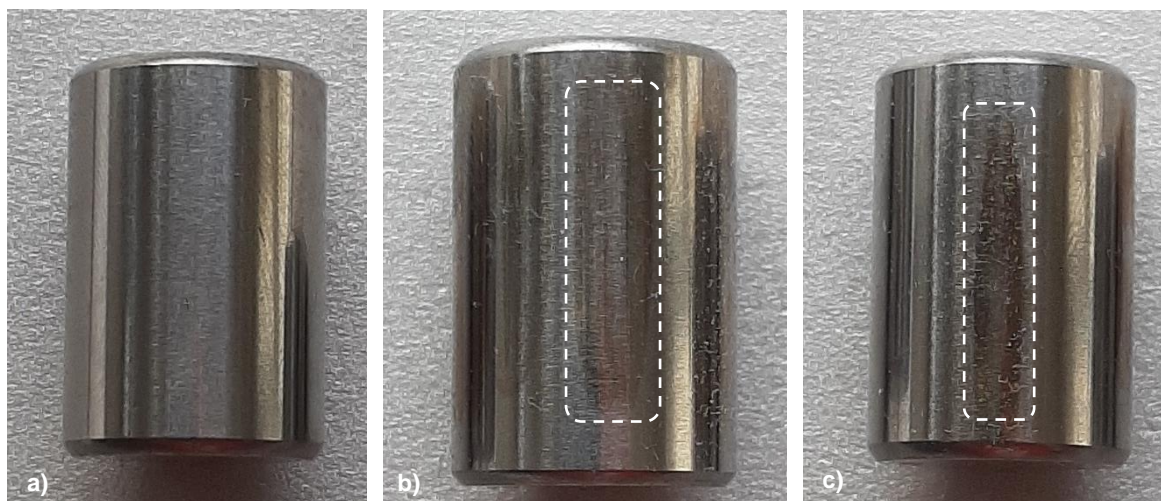
Protože MR tlumiče mohou být použity i v aplikacích, které není vyžadována tak vysoká životnost tlumiče, ale naopak je preferována minimální třecí síla, je zde výhodné použití materiálu s minimální hodnotou součinitele tření. Tím dojde ke snížení parazitních třecích sil na minimum. Jedním z hlavních zdrojů třecích sil v MR tlumiči je právě styk těsnění a pístnice. Z toho důvodu je vhodné vědět, jaká materiálová dvojice má minimální koeficient tření.

Tab. 5-1 Velikost koeficientu tření v závislosti na použitém materiálu těsnění

Materiál těsnění	Průměrný COF
Polyuretany	0,13-0,15
SBR, NBR	0,15-0,18
PTFE	0,10-0,12

Z výsledků v tab. 5-1 je vidět, že nejlepší třecí vlastnosti vykazoval materiál PTFE. Všechny testované polyuretany vykazovaly o trochu vyšší COF, ovšem jsou také jednodušší na použití a těsnění z nich zhotovené nevyžaduje další manžetu, která by zabránila „pocení“ pístnice. Celé výsledky jsou v příloze 1 a 2 na obr. P-1 a P-2.

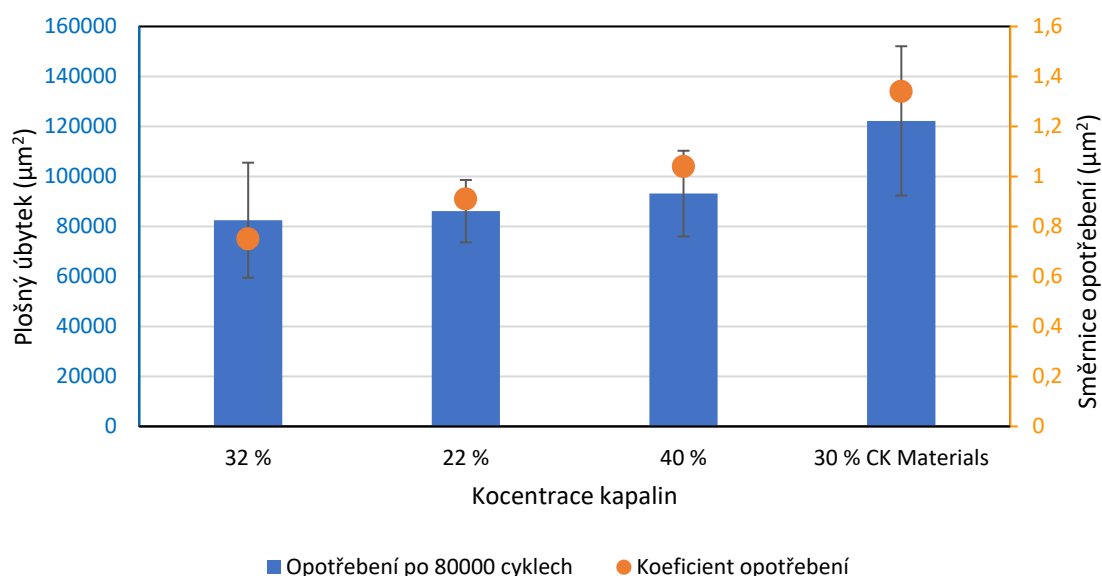
Abrazivní prostředí má ovšem vliv nejenom na samotné těsnění, ale také na pístnici, potažmo válcový pin. Samotný pin byl v po testech v kapalině MRF-132DG pouze mírně opotřeben. Na pinu byly patrné stopy po doteku s testovacím vzorkem, kdy se pin zbarvil do naoranžovělé barvy. Samotné stopy byly největší u pinu, se kterým byly provedeny testy na materiálu NBR, což je dáno tím, že samotný vzorek byl nejmenší a tím pádem byla největší i styčná plocha. Samotná struktura povrchu však byla ovlivněna relativně málo. Drsnost se zvýšila z $Ra\ 0,1 - 0,13\ \mu m$ u neopotřebovaného pinu na cca $0,15 - 0,3\ \mu m$ u opotřebovaného pinu pro polyuretany a PTFE. U materiálu NBR a SBR byly naměřeny drsnosti o něco málo vyšší, $0,2 - 0,35\ \mu m$. Ovšem vzhledem k tomu, že hodnoty drsností se poměrně prolínají, nedá se jasně určit, že materiály NBR a SBR opotřebovávají povrch více než materiály PU (obr. 5-8).



Obr. 5-8 a) nový pin, b) pin v kontaktu s NBR, c) pin v kontaktu s PU (bílá oblast – kontakt)

5.2.3 Testy abrazivity MR kapalin

Při testu velikosti abrazivity kapalin bylo zjištěno (obr. 5-9), že pro kapaliny se stejným složením, odlišujícím se pouze koncentrací částic, je abrazivita přibližně podobná. Z grafu lze odečíst, že nejmenší opotřebení vykazuje kapalina MRF-132DG s objemovým poměrem částic 32 %. Ostatní kapaliny s poměrem 22 % a 40 % vykazovaly mírně větší abrazivitu (především v kritériu koeficientu opotřebení). Vzhledem k tomu, že není žádný vědecký předpoklad pro sníženou abrazivitu kapaliny s objemovým poměrem 32 %, dá se očekávat, že ve větším statistickém souboru by se výsledky srovnaly.



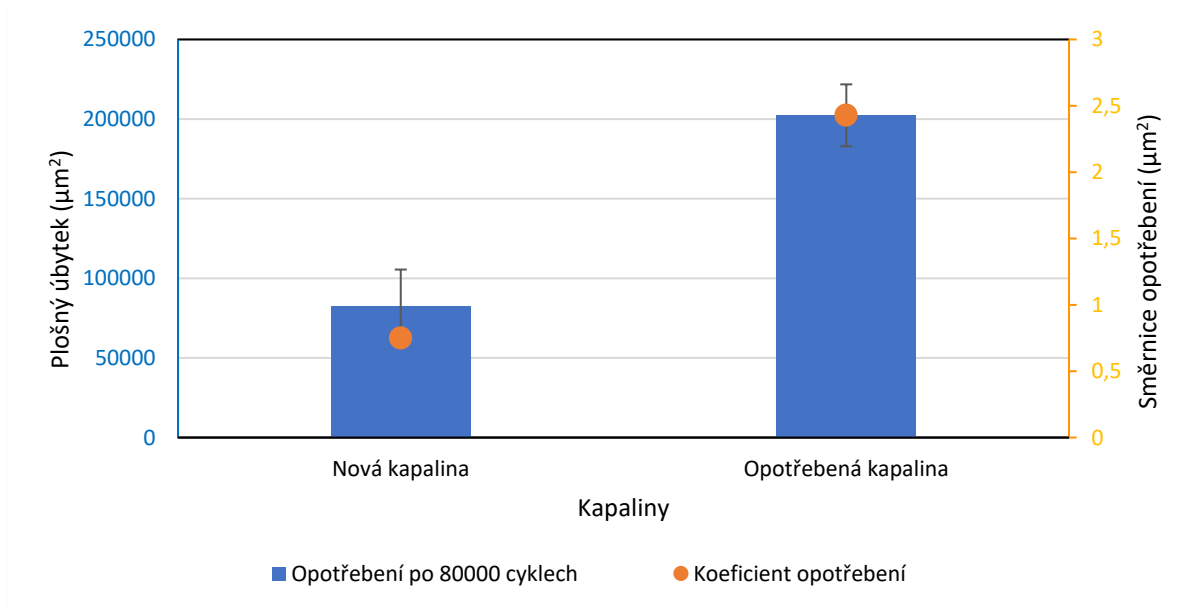
Obr. 5-9 Velikost opotřebení materiálu H-PU95FDA v závislosti na koncentraci kapalin

Zajímavé je také srovnání s kapalinou MRC-S1L, která má podobné složení jako kapalina MRF-132DG. To se ovšem týká poměru hlavních komponent, nikoliv však aditiv či dokonce vlastností částic, což jsou ovšem parametry, jež nejsou veřejně přístupné a jejich správná kombinace je součástí „know-how“ každého výrobce. Jak ukazují výsledky, tyto parametry mají větší vliv na abrazivitu MR kapalin než samotná koncentrace částic. Pro všechny kapaliny platí, že u všech testů se COF pohyboval kolem 0,14. Celé výsledky jsou přiloženy na obr. P1-3 v příloze 3. Vliv koncentrace kapalin byl také vyzkoumán v kontaktu ocel-ocel (příloha 7), kdy se potvrdil trend daný tímto testem, a to že koncentrace nemá v těchto koncentracích vliv na abrazivitu. Drsnosti pinů po testech zůstávají v intervalech 0,15-0,3 po všechny testované kapaliny.

5.2.4 Vliv degradace MR kapaliny na opotřebení

MR kapalina vykazuje v průběhu své životnosti velmi vysokou míru degradace. Jedná se především o opotřebení MR částic, které se štěpí a tím se mění i jejich tvar. Proto bylo vhodné provést test, jak degradace částic ovlivňuje opotřebení těsnících prvků.

Na grafu (obr. 5-10) jde vidět, že testovací vzorek v opotřebované kapalině vykazoval skoro trojnásobné opotřebení v porovnání s novou kapalinou. Opotřebovaná kapalina, zřejmě z důvodu již aktivovaných antisedimentačních aditiv, měla poměrně vysokou viskozitu. Vzhledem k tomu, že kapalina v místě dotyku absorbovala část tepla vzniklého třením, snížila se ještě v záběhovém cyklu viskozita v okolí styku na standardní úroveň. Ovšem v okolí zůstávala kapalina stále „gelovitá“ a tím byla snížena její schopnost absorpce tepla.



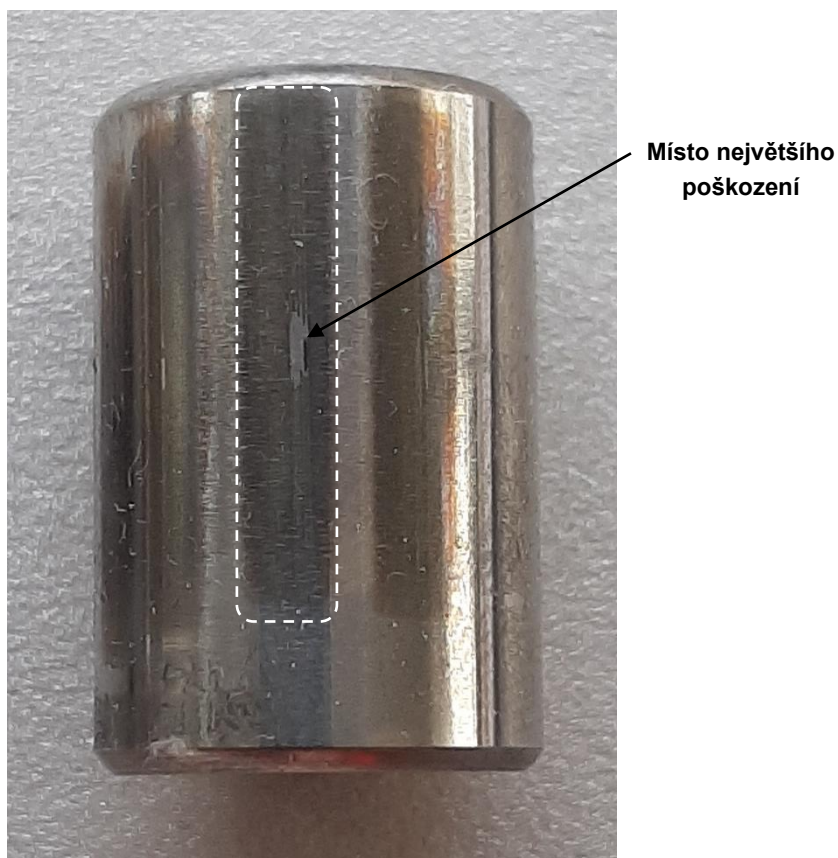
Obr. 5-10 Vliv opotřebení kapaliny MRF-132DG na opotřebení materiálu H-PU95FDA

To spolu se zvýšeným koeficientem tření (tab. 5-2) přispělo ke většímu tepelnému zatížení kontaktu. Normální teplota válcového pinu se u většiny testů pohybovala okolo 30-35 °C, u testu s opotřebovanou kapalinou to bylo přes 50 °C, což mohlo přispět k radikálnímu nárůstu opotřebení. V tlumiči by došlo k většímu promíchání kapaliny a tím i redistribuování tepla od místa kontaktu. Prezentované výsledky je tedy nutné brát s určitou rezervou, protože také není znám tvar částic. Tato problematika by měla být předmětem dalšího vývoje.

Tab. 5-2 Velikost koeficientu tření dle opotřebovanosti MR kapaliny

Kapalina	Průměrný COF
Nová	0,13-0,15
Opotřebovaná	0,18-0,2

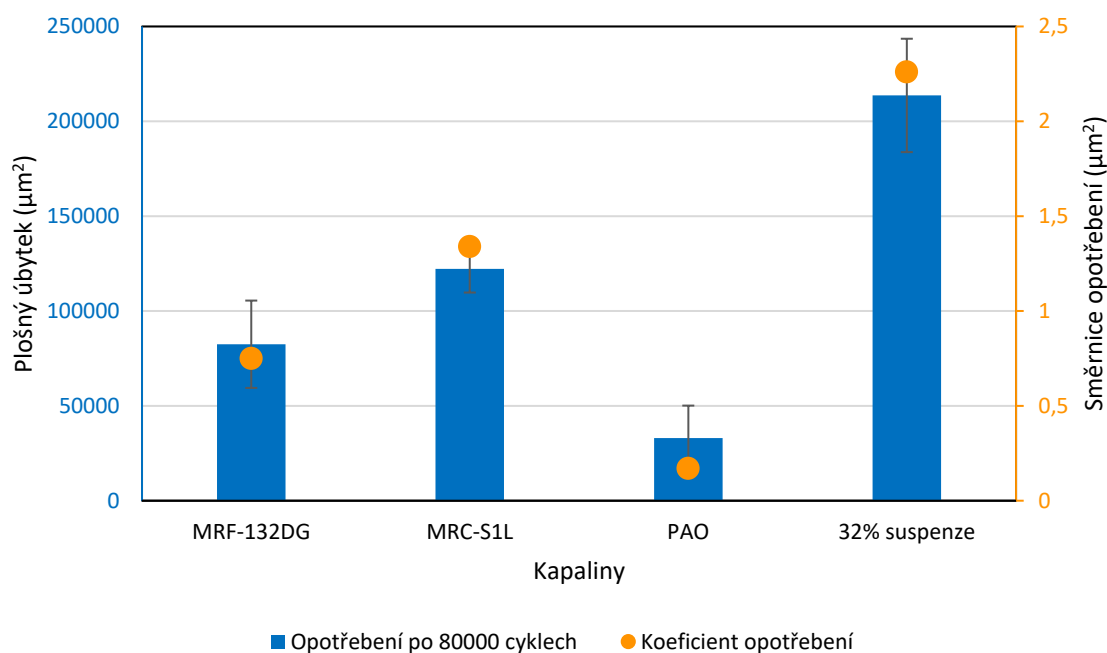
Opotřebovaná kapalina měla i výrazný vliv na opotřebení pinu (obr. 5-11). Samotná styková plocha byla značně zabarvena tmavě, což by měl výt vliv vyššího tepelného zatížení. V této oblasti vykazoval pin Ra okolo 0,25-0,35 μm, což jsou mírně vyšší hodnoty, než u testu v neopotrebované kapalině. Rozdílem ale je, že přibližně v prostředku pinu, tedy v místě, kde jednak byl pin v neustálém kontaktu se vzorkem (7,5 mm pohyb vs. 10 mm vzorek) a kde pin také vtahoval částice do kontaktu, jsou výrazné rýhy a drsnost je zde dosahuje až Ra 2 μm.



Obr. 5-11 Opotřebený pin po testu v opotřebené kapalině (bílá oblast – kontakt)

5.2.5 Vliv komponent MR kapaliny na opotřebení

Pro pořádné porovnání, jak vlastně vysoké je opotřebení způsobené MR kapalinami, je nutné toto opotřebení srovnat s polyalfaolefinem, který tvoří základovou kapalinu (což nám dá i představu o opotřebení standardního hydraulického tlumiče) a srovnání se suspenzí základové kapaliny a MR částic (obr. 5-12), tzn. jednoduchou MR kapalinou bez jakékoliv modifikace, to především pro stanovení referenční hladiny v případě vývoje vlastní kapaliny.



Obr. 5-12 Vliv součástí MR kapalin na složkách kapalin

Dle očekávání bylo opotřebení způsobené v kontaktu zaplaveném pouze PAO výrazně nižší než v případě standardní MR kapaliny. Toto srovnání jasně demonstuje, proč mají klasické tlumiče vyšší životnost než tlumiče magnetoreologické. Zároveň byl koeficient tření velmi nízký.

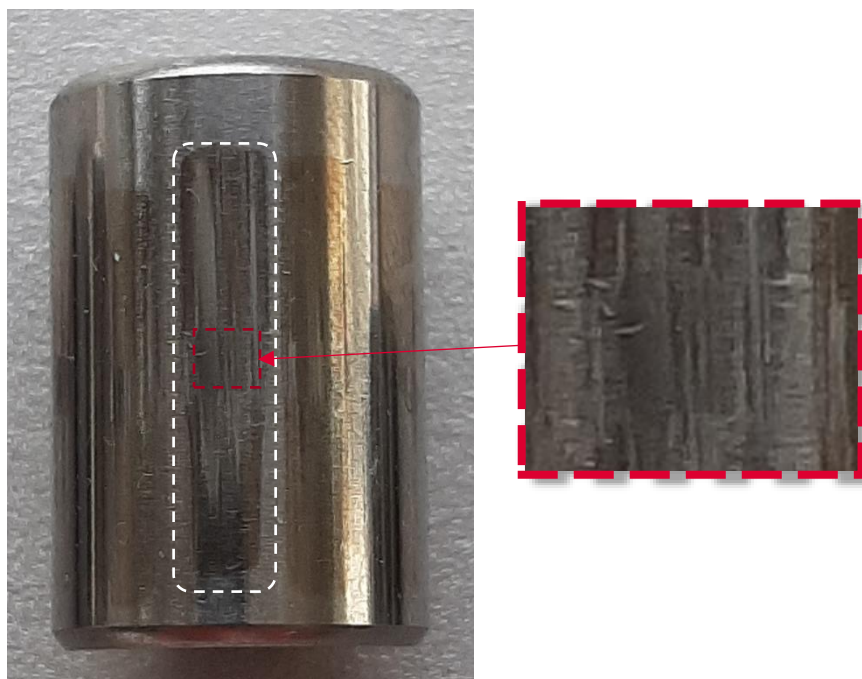
Výsledky testu v suspenzi již přinesly cca 3x vyšší opotřebení než v případě referenční kapaliny MRF-132DG. Samotné testování provázal velký hluk od testovaného styku, a to především v době záběhu vzorku, kdy byl skřípavý zvuk značně hlasitý. Po záběhu se sice hladina zvuku snížila, ovšem nikdy nevymizela. Na rozdíl však od testů opotřebované kapaliny zde rapidně nerostl koeficient tření, a ani nerostla teplota pinu.

Výsledky porovnání komerčních kapalin o objemovém podílu částic okolo 32 % a kapaliny bez jakýchkoliv vylepšení ukázaly, jak vysoký je vliv modifikace, kdy se výrobcům podařilo srazit rapidně srazit abrazivitu kapaliny, při zachování vysokých poměrů částic v kapalině.

Tab. 5-3 Velikost koeficientu tření dle použité kapaliny

Kapalina	Průměrný COF
MRF-132DG	0,13-0,15
Polyalfaolefin	0,05-0,06
32% suspenze	0,14-0,17

Pin po testech v polyalfaolefinu nevykazoval veliké známky opotřebení, i drsnost se držela do $Ra\ 0,15\ \mu\text{m}$, což se dá považovat za neopotřebený pin. Ovšem v případě použití vlastní MR kapaliny došlo k výraznému opotřebení (obr. 5-13). Je vidět oblast styku pinu a vzorku, která ale není tak výrazně ovlivněna tepelným působením, jako v případě opotřebené kapaliny, takže její vzhled je velmi podobný, jako v případě komerčních kapalin a má drsnost okolo $Ra\ 0,2\text{--}0,4\ \mu\text{m}$. Ovšem opět v místě trvalého dotyku dochází k výraznému zvýšení drsnosti až k $Ra\ 1,8\ \mu\text{m}$ (detail na obr. 5-13).



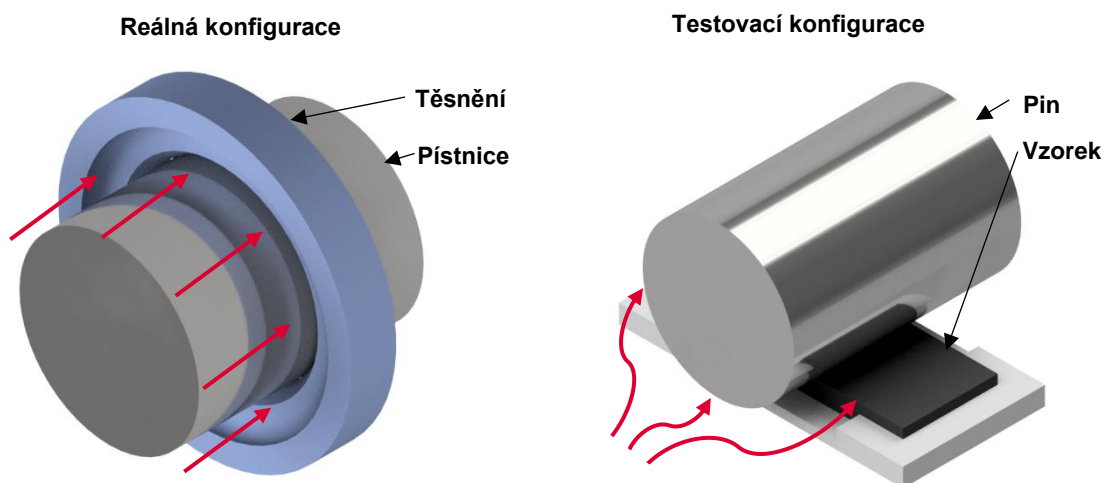
Obr. 5-13 Opotřebení pinu v suspenzi (bílá oblast – styková plocha, červená – oblast vstupu)

6 DISKUZE

Jak vyplynulo z předchozích kapitol, všechny testy byly provedeny na tribometru Bruker UMT Tribolab v konfiguraci pin-on-flat. Tato konfigurace se ukázala být jako vhodná pro porovnání velikosti abrazivity, ale má také svoje slabiny.

Jde především o proměnný tvar styku obou testovaných těles, kdy se styk mění poměrně zásadně (od nekonformního styku válce a plochy až po vydřenou drážku, u které se s každým cyklem zvyšuje styčná plocha). Opotřebení těsnící manžety vypadá trochu jinak, a to především tím, že se opotřebovává a strhává těsnící břit. Tady tento jev způsobuje, že takhle testovací konfigurace nemusí být moc vhodná pro předpověď životnosti těsnění v samotném tlumiči.

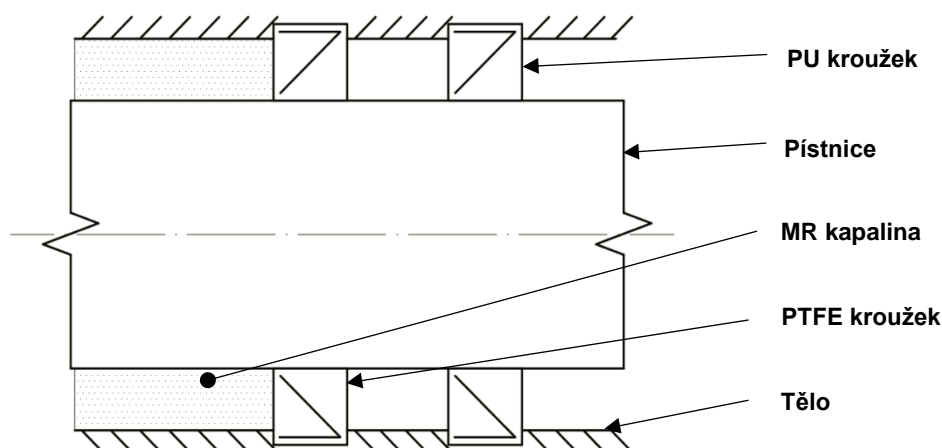
Dále také v téhle konfiguraci mohlo nastat to, že částice nemusely být vtahovány do kontaktu tak výrazně, jako v případě reálného kontaktu, protože na testovacím vzorku mají částice možnost styk obou těles obejít (obr. 6-1). Dalším potenciálním problémem testované konfigurace je testování za teploty okolí. Ve skutečnosti olej v tlumiči musí pojmout teplo vytvořené z disipované kinetické energie a teplota kapaliny může být i 80 °C. Nicméně lze konstatovat, že tato konfigurace je vhodná pro porovnávací testy.



Obr. 6-1 Možný pohyb částic v daném kontaktu (červeně)

Výsledky odolnosti materiálu dopadly dle předpokladů, jako nejlepší se ukázaly materiály H-PU95FDA, H-PU55D a LT-PU. Tím se **potvrdila hypotéza č. 2** a to, že nejvýhodnější z hlediska odolnosti proti opotřebení jsou materiály na bázi PU. Materiál SL-PU vykázal vysokou odchylku měření. V případě provedení více testů by mohl i tento materiál vykázat podobný trend opotřebení jako zbývající polyuretany a být tak také teoreticky vhodný pro použití.

Další materiál, který by mohl být teoreticky vhodný pro konstrukci těsnících prvků je PTFE. Tento materiál sice vykázal špatnou odolnost proti opotřebení, ale zato nejnižší koeficient tření. To může teoreticky činit tento materiál vhodný pro použití v tlumičích, které nejsou projektované s ohledem na životnost, ale hlavní důraz je u nich kladen na precizní nastavení tlumicí charakteristiky, které třecí síly narušují. Šlo by např. o tlumiče pro použití v aerospace aplikacích. Tento materiál ale může mít problém pořádně utěsnit prostor kolem pístnice, a tudíž by se mohlo stát, že by základová kapalina protékala a tlumič by „vytekl“. To se dá řešit použitím dvojitého těsnění, kdy PTFE bude tvořit hlavní těsnění a PU kroužek sekundární. Tím ale je eliminována hlavní výhoda PTFE těsnění, a to nižší parazitní síly.



Obr. 6-2 Možnost použití dvou O-kroužků

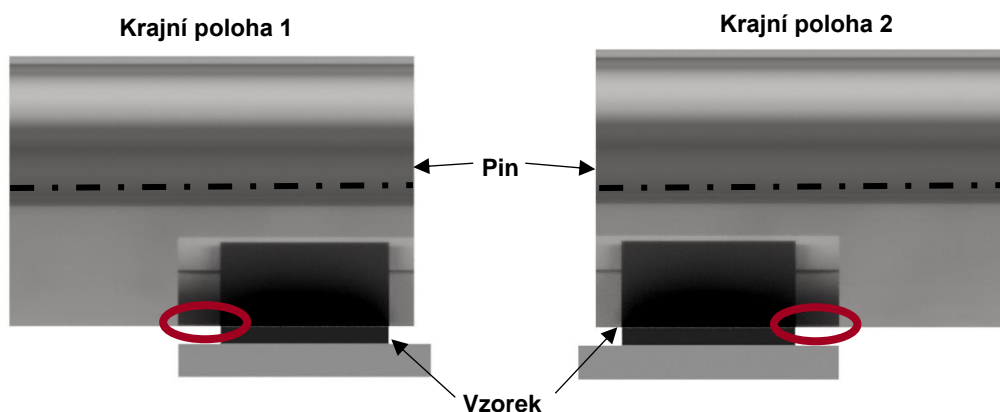
Dalším vliv na opotřebení těsnících prvků má složení kapaliny. Samotná koncentrace částic při takhle vysokých hodnotách již nehraje velikou roli z hlediska opotřebení, a tak může konstruktér volit mezi dostupnými MR kapalinami stejného výrobce (za předpokladu stejného složení) dle jiných parametrů (viskozita, mez toku, magnetické vlastnosti atd.). Tím byla **potvrzena hypotéza č. 1**.

Daleko větším činidlem opotřebení se tak jeví použití rozdílné aditivace či použití jiných MR částic, jak ukázalo srovnání kapalin MRF-132DG od společnosti LORD a MRC-S1L od CK Materials, přičemž je zde předpoklad, že oba výrobci používají pro výrobu MR kapalin jiné přísady. Tyto kapaliny mají podobnou koncentraci, tudíž by měly mít podobné opotřebení, ale kapalina MRC-S1L se však ukázala být jako více abrazivní. Tento jev byl ještě více zvýrazněn při porovnání kapalin s PAO (nosná kapalina) a 32% suspenzí částic. Při tomto porovnání se ukázalo, že obě komerční kapaliny jsou minimálně o polovinu méně abrazivní než porovnávaná suspenze bez aditiv. Kdyby byla koncentrace hlavním činidlem opotřebení, přibližovala by se velikost opotřebení testovaných komerčních kapalin právě referenční suspenzi.

Mezi vlastnosti, které ovlivňují opotřebení zřejmě nejvíce, patří především velikost, tvar a tvrdost MR částic. Vybrat správné částice není triviální věc, protože jenom firma BASF nabízí okolo 30 různých druhů částic [48] a částice musí být vybrány i s ohledem na výkonnost. Další činitelem je základový olej, který může být dále aditivován různými antiwear či extreme pressure aditivy. Tato aditiva jsou sice vhodnější pro redukci adhezivního opotřebení, jež se v testu nevyskytovalo, ale mohou pomoci i s redukcí abraze. Viskozita MR základové kapaliny bude mít také vliv na způsobené opotřebení. Pro zvýraznění MR jevu je potřeba použít co nejméně viskózní kapalinu, která ovšem nedokáže tolik ochránit funkční povrchy od působení abrazivních MR částic.

Testy vlivu degradované MR kapaliny přinesly zajímavé zjištění, že opotřebení kapaliny má veliký vliv na způsobené opotřebení. Vzorek zkoumaný v opotřebované MR kapalině vykazoval cca 3x vyšší opotřebení než v kapalině nové. Tento výsledek zcela **vyvrátil hypotézu č. 3**. Samotné opotřebení vzorku ovšem nemusí jít na vrub pouze zvýšené abrazivitě MR částic, ale také se zde může projevit nedostatek testovací konfigurace. Samotný vzorek totiž vypadal daleko „čistěji“, než např. vzorek po testování v 32% suspenzi, která vykazovala podobně velké opotřebení. Výsledek tak mohl být ovlivněn vyšším tepelným zatížením než případě všech ostatních testů. To bylo způsobeno jak v největším koeficientem tření (až 0,2), kvůli kterému bylo v kontaktu generováno nejvíce parazitního tepla, ale také vysokou gelovitostí kapaliny ve vzdálenosti min. 1 cm od styku, což mohlo snižovat rozptyl tepla po kapalině a následnou disipaci tepelné energie do prostoru. To vedlo ke zvýšené teplotě v průběhu testů, která tak mohla vyrůst přes 50 °C, místo obvyklých 30 °C. V případě reálného použití v tlumiči by byla kapalina více promíchávána, a navíc více zahřívána teplem mařící se kinetické energie a mohlo by se stát, že teplota všech kontaktů by byla podobná. Nikdo se však zatím problematice opotřebovaných kapalin nevěnoval, a tak není jisté, který z činitelů má největší vliv na opotřebení materiálových vzorků, a to jak v testovací konfiguraci, tak hlavně na reálném tlumiči. Může se nakonec ukázat, že porovnání neopotřebovaných kapalin nemusí mít nakonec nijak průkazný vliv na životnost tlumiče.

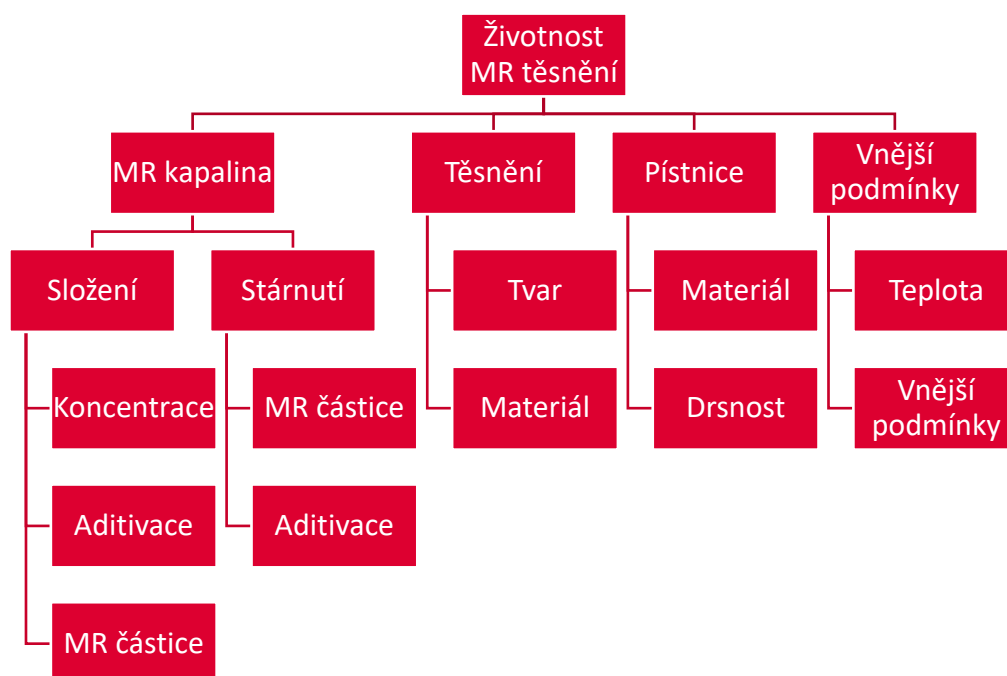
Důležitým vlivem na životnost tlumiče je i struktura povrchu pístnice. Čím je povrch drsnější, tím více se opotřebovává těsnění, a tudíž je vhodné se zaměřit i na tento parametr. Při srovnání všech testů se však ukázalo, že opotřebení testovacího pinu (pístnice) je poměrně nezávislé na testovaném protikusu (všechny testované vzorky měly daleko menší tvrdost než pin, což přispívá k delší životnosti pinu). Naopak pro testované kapaliny opotřebení pinu přibližně kopíruje trend, který je daný výsledky opotřebení polymerního vzorku, tzn. nejhůře si vedla namixovaná MR kapalina a opotřebovaná MR kapalina, a to především v oblasti trvalého kontaktu se vzorkem a místě vniku částic do kontaktu (obr. 6-3). Opotřebovaná MR kapalina navíc způsobila vyšší teplotní zatížení pinu, které by však nemělo opotřebovat pin z hlediska oxidačního opotřebení (tzn. tvorby a odlupování vrstev oxidů z povrchu pinu).



Obr. 6-3 Místo největšího opotřebení pinu (červeně) a jeho poloha vůči vzorku v krajních polohách pinu

Určení životnosti těsnících prvků je složitým problémem. Dle provedených testů je možné odhadnout životnost těsnění pomocí porovnání životnosti známé konfigurace, ke které přidáme určitý koeficient v závislosti na zjištěných velikostech opotřebení, tzn. pokud např. je známa životnost těsnění ve dvojici MRF-132DG a H-PU95FDA, tak se dá předpokládat, že pro dvojici MRC-S1L a H-PU95FDA bude životnost přibližně $\frac{3}{4}$.

Takhle lze životnost odhadnout pouze za předpokladu, že není zahrnutý vliv stárnutí kapalin, či jiných vnějších podmínek. Z již zmíněných podmínek tak může hrát roli na životnost tlumiče ještě např. drsnost pístnice, teplota či vystavení agresivnímu prostředí z vnějšku tlumiče. Pro kompletní výzkum opotřebení těsnících kroužku by bylo vhodné vyhodnotit opotřebení tak, jak je nezačeno na obr. 6-4.



Obr. 6-4 Schéma vlivů na životnost těsnění

7 ZÁVĚR

V této diplomové práci byl zkoumán vliv několika zásadních parametrů na opotřebení. Měření bylo prováděno na zjednodušené konfiguraci, pro kterou byl upraven tribometr Bruker, pro který byl zhotoven držák pinu a držák vzorků.

V rámci zkoumání vliv koncentrace MR částic na opotřebení těsnících materiálů, kdy vyšlo najevo, že koncentrace částic nemá zásadní vliv na abrazivitu, přesně tak jak předpovídala hypotéza č.1. Naopak byla u kapalin o stejných koncentracích MR částic pozorována značný rozptyl opotřebení, což značí, že vliv na opotřebení budou mít jiné faktory MR kapalin, např. aditivace či vlastnosti MR částic.

Dále byl zkoumán vliv opotřebení kapaliny, kdy bylo zjištěno, že opotřebovaná kapalina způsobuje daleko vyšší opotřebení než kapalina nová, což je v rozporu s hypotézou č. 3.

Jeden z nejdůležitějších parametrů z hlediska životnosti těsnění je jeho materiál. Zde se jako nejlepší ukázaly materiály H-PU95FDA, H-PU55D a LT-PU a tím byla potvrzena hypotéza č. 2. Teflon naopak vykázal horší odolnost proti opotřebení, ale bylo u něho naměřen nejmenší koeficient tření, a to z něj dělá vhodný materiál pro použití ve speciálních aplikacích, kde je nízký koeficient tření vyžadován.

Pro použití ve standardním MR tlumiči se tedy nejlépe jeví použití kombinace těsnění z materiálu H-PU95FDA a kapaliny MRF-132DG. Jako alternativu lze pak použít i těsnění z materiálu H-PU55D a LT-PU v kombinaci s jakoukoliv zkoumanou kapalinou od firmy LORD. Mohu tak prohlásit, že všechny cíle stanovené zadáním byly splněny.

Protože oblast použití těsnících materiálů v abrazivním prostředí MR kapalin není téma moc prozkoumané, osvětlila tato práce alespoň část tohoto tématu, především hlediska praktického využití. Prostorů pro rozšíření této práce existuje několik:

- Rozšíření portfolia materiálů a MR kapalin,
- Porovnání zjednodušené konfigurace s reálným tlumičem,
- Výzkum opotřebení z hlediska stáří MR kapaliny,

Jako nejperspektivnější se jeví poslední možnost, protože o opotřebované kapalině se neví skoro vůbec nic, a přitom v opotřebovaném režimu pracuje kapalina min 80 % životnosti tlumiče, v průběhu, ve kterém se opotřebení kapaliny stále zvyšuje.

8 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] LORD, Philip. What is Magnetic Ride Control? *carsales.com*. 2018 [vid. 20. únor 2020]. Dostupné z: <https://www.carsales.com.au/editorial/details/what-is-magnetic-ride-control-111180/>
- [2] UNUH, Mohd Hishamuddin a Pauziah MUHAMAD. A Brief Review of Preparation Method and Challenges of Magnetorheological Fluids. *Journal of Advanced Research in Materials Science*. 2020, roč. 74, č. 1, s. 1–18. ISSN 22897992.
- [3] XIE, Lei, Young-Tai CHOI, Chang-Rong LIAO a Norman M WERELEY. Long term stability of magnetorheological fluids using high viscosity linear polysiloxane carrier fluids. *Smart Materials and Structures*. 2016, roč. 25, č. 7, s. 075006. ISSN 0964-1726.
- [4] FEI, Chen, Li HAOPENG, Han MENGMEING, Tian ZUZHI a Li AIMIN. Preparation of magnetorheological fluid with excellent sedimentation stability. *Materials and Manufacturing Processes*. 2020, roč. 35, č. 10, s. 1077–1083. ISSN 1042-6914.
- [5] QIAO, Xiuying, Mingwen BAI, Ke TAO, Xinglong GONG, Rui GU, Hiroshi WATANABE, Kang SUN, Jingyuan WU a Xiaoyu KANG. Magnetorheological Behavior of Polyethylene Glycol-Coated Fe₃O₄ Ferrofluids. *Nihon Reorogi Gakkaishi*. 2010, roč. 38, č. 1, s. 23–30. ISSN 0387-1533.
- [6] GURUBASAVARAJU, T. M., Hemantha KUMAR a M. ARUN. Evaluation of optimal parameters of MR fluids for damper application using particle swarm and response surface optimisation. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*. 2017, roč. 39, č. 9, s. 3683–3694. ISSN 1678-5878.
- [7] KCIUK, M. a Turczyn R. Properties and application of magnetorheological fluids. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*. 2006, roč. 18, č. 1–2, s. 127–130.
- [8] YANG, G., B. F. SPENCER, J. D. CARLSON a M. K. SAIN. Large-scale MR fluid dampers: Modeling and dynamic performance considerations. *Engineering Structures*. 2002, roč. 24, č. 3, s. 309–323. ISSN 01410296.
- [9] Working models of magnetorheological fluids. *Active Structures Laboratory*. 2011 [vid. 18. leden 2021]. Dostupné z: https://scmero.ulb.ac.be/project.php?id=9&page=MR_modes.html
- [10] KALUVAN, Suresh, Hwan-Choong KIM, Jong-Seok OH a Seung-Bok CHOI. A State-of Art of Creative Sensor Devices Utilizing Magneto- Rheological Fluids. *International Journal of Mechanical Systems Engineering*. 2015, roč. 1, č. 2. ISSN 24557412.
- [11] ŞAHİN, İ, T ENGİN a Ş ÇEŞMECI. Comparison of some existing parametric models for magnetorheological fluid dampers. *Smart Materials and Structures*. 2010, roč. 19, č. 3, s. 035012. ISSN 0964-1726.
- [12] VOCEL, Milan a Vladimír DUFEK. *Tření a opotřebení strojních součástí*. Praha: SNTL, 1976.
- [13] KATO, K. Classification of Wear Mechanisms/Models. In: *Wear - Materials, Mechanisms and Practice*. Chichester, England: John Wiley & Sons Ltd, 2014, s. 9–20. Dostupné z: doi:

- [14] WILLIAMS, J.A. a A.M. HYNICCA. Mechanisms of abrasive wear in lubricated contacts. *Wear*. 1992, roč. 152, č. 1, s. 57–74. ISSN 00431648.
- [15] MARU, Marcia M. a Deniol K. TANAKA. Influence of loading, contamination and additive on the wear of a metallic pair under rotating and reciprocating lubricated sliding. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*. 2006, roč. 28, č. 3. ISSN 1678-5878.
- [16] SONG, Wan Li, Chul Hee LEE a Seung Bok CHOI. Sliding wear behavior of magnetorheological fluid for brass with and without magnetic field. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China (English Edition)*. 2013, roč. 23, č. 2, s. 400–405.
- [17] SONG, Wan Li, Chul Hee LEE a Seung Bok CHOI. Sliding wear behavior of magnetorheological fluid for brass with and without magnetic field. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China (English Edition)*. 2013, roč. 23, č. 2, s. 400–405.
- [18] LEE, Chul Hee, Deuk Won LEE, Jae Young CHOI, Seung Bok CHOI, Won Oh CHO a Hyuk Chae YUN. Tribological Characteristics Modification of Magnetorheological Fluid. *Journal of Tribology*. 2011, roč. 133, č. 3, s. 031801. ISSN 07424787.
- [19] GAHR, K. H.Zum. Sliding Wear. In: *Tribology Series*. 1987, s. 351–495. ISBN 978-0-444-42754-0. Dostupné z: doi:
- [20] GAHR, K. H.Zum. Wear by hard particles. *Tribology International*. 1998, roč. 31, č. 10, s. 587–596. ISSN 0301679X.
- [21] CHOTĚBORSKÝ, R., P. HRABĚ, M. MÜLLER, J. SAVKOVÁ, M. JIRKA a M. NAVRÁTILOVÁ. Effect of abrasive particle size on abrasive wear of hardfacing alloys. *Research in Agricultural Engineering*. 2009, roč. 55, č. 3, s. 101–113. ISSN 12129151.
- [22] FOWLER, G., I. R. PASHBY a P. H. SHIPWAY. The effect of particle hardness and shape when abrasive water jet milling titanium alloy Ti6Al4V. *Wear*. 2009, roč. 266, č. 7–8, s. 613–620. ISSN 00431648.
- [23] LEUNG, W. C., W. A. BULLOUGH, P. L. WONG a C. FENG. The effect of particle concentration in a magneto rheological suspension on the performance of a boundary lubricated contact. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*. 2004, roč. 218, č. 4, s. 251–263. ISSN 13506501.
- [24] SADOWSKI, Przemysław a Stanisław STUPKIEWICZ. Friction in lubricated soft-on-hard, hard-on-soft and soft-on-soft sliding contacts. *Tribology International*. 2019, roč. 129, č. June 2018, s. 246–256. ISSN 0301679X.
- [25] IYENGAR, Vardara J A N R, Alexander A ALEXANDRIDIS, Simon C TUNG a David S RULE. Wear Testing of Seals in Magneto-Rheological Fluids © Wear Testing of Seals in Magneto-Rheological Fluids. 2010, roč. 2004.
- [26] BAE, Junho a Koo Hyun CHUNG. Accelerated wear testing of polyurethane hydraulic seal. *Polymer Testing*. 2017, roč. 63, s. 110–117. ISSN 01429418.
- [27] AYALA, Hugo M., Douglas P. HART, Oscar C. YEH a Mary C. BOYCE. Wear of elastomeric seals in abrasive slurries. *Wear*. 1998, roč. 220, č. 1, s. 9–21. ISSN 00431648.
- [28] SHEN, Mingxue, Bo LI, Zhinan ZHANG, Longzhi ZHAO a Guangyao XIONG. Abrasive wear behavior of PTFE for seal applications under abrasive-atmosphere sliding condition. *Friction*. 2020, roč. 8, č. 4, s. 755–767. ISSN 22237704.

- [29] UNAL, H., U. SEN a A. MIMAROGLU. Study of abrasive wear volume map for PTFE and PTFE composites. *Applied Composite Materials*. 2007, roč. 14, č. 5–6, s. 287–306. ISSN 0929189X.
- [30] KHEDKAR, Jaydeep, Ioan NEGULESCU a Efstathios I. MELETIS. Sliding wear behavior of PTFE composites. *Wear*. 2002, roč. 252, č. 5–6, s. 361–369. ISSN 00431648.
- [31] WANG, Na, Shuo PANG, Cuili YE, Tingting FAN a Seung Bok CHOI. The friction and wear mechanism of O-rings in magnetorheological damper: Numerical and experimental study. *Tribology International*. 2021, roč. 157, č. January, s. 106898. ISSN 0301679X.
- [32] ASTM INTERNATIONAL. ASTM G 132-96 Standard Test Method for Pin Abrasion Testing. *American society for testing and materials*, , *ASTM International*. 2001, roč. 96, č. Reapproved, s. 1–8.
- [33] KASPRZAK, Jim. *Understanding your Dampers*. nedatováno. Dostupné z: <http://www.kaztechnologies.com/wp-content/uploads/2014/03/A-Guide-To-Your-Dampers-Chapter-from-FSAE-Book-by-Jim-Kasprzak.pdf>
- [34] ŽÁČEK, Jiří. *Měření opotřebení tlumiče s magnetoreologickou kapalinou*. B.m., 2019. Vysoké učení technické v Brně. Dostupné z: <https://bit.ly/2SM6RQ4>
- [35] Materiály. *Sittech Hydraulika*. 2016 [vid. 26. duben 2021]. Dostupné z: <https://www.sittech-hydraulika.cz/materialy>
- [36] Těsnění. *Hennlich s.r.o.* 2021 [vid. 22. leden 2021]. Dostupné z: <https://www.hennlich.cz/produkty/tesneni-89.html>
- [37] O-kroužky. *Alfa Agro Brno s.r.o.* [vid. 20. leden 2021]. Dostupné z: <http://www.alfaagro.cz/o-krouzky.php>
- [38] Durometer Shore Hardness Scale. *Smooth-On, Inc.* 2021 [vid. 22. leden 2021]. Dostupné z: <https://www.smooth-on.com/page/durometer-shore-hardness-scale/>
- [39] ROUPEC, Jakub, Filip JENIŠ, Zbyněk STRECKER, Michal KUBÍK a Ondřej MACHÁČEK. Stribeck curve of magnetorheological fluid within pin-on-disc configuration: An experimental investigation. *Materials*. 2020, roč. 13, č. 20, s. 1–11. ISSN 19961944.
- [40] LORD CORPORATION. MRF-122EG Magneto-Rheological Fluid. *MRF-122EG Magneto-Rheological Fluid*. 2008 [vid. 19. duben 2019]. Dostupné z: <https://bit.ly/2ZH1DX1>
- [41] LORD CORPORATION. *MRF-132DG Magneto-Rheological Fluid*. 2011 [vid. 19. duben 2019]. Dostupné z: <https://bit.ly/2J7CnnB>
- [42] LORD CORPORATION. *MRF-140CG Magneto-Rheological Fluid*. 2008 [vid. 19. duben 2019]. Dostupné z: <https://bit.ly/2LmKRKj>
- [43] Magneto-Rheological Fluid Solution. *CK Materials Lab*. [vid. 2. duben 2021]. Dostupné z: <http://ckmaterials.com/en/business/p2/#top>
- [44] HREINSSON, Einar. *Durability of a Magnetorheological Fluid in a Prosthetic Knee Joint*. B.m., 2011. Mechanical Engineering and Computer Science University of Iceland.

- [45] UTAMI, Dewi, UBAIDILLAH, Saiful A. MAZLAN, Fitriani IMADUDDIN, Nur A. NORDIN, Irfan BAHIUDDIN, Siti Aishah ABDUL AZIZ, Norzilawati MOHAMAD a Seung Bok CHOI. Material characterization of a magnetorheological fluid subjected to long-term operation in damper. *Materials*. 2018, roč. 11, č. 11. ISSN 19961944.
- [46] DE VICENTE, Juan, Daniel J. KLINGENBERG a Roque HIDALGO-ALVAREZ. Magnetorheological fluids: a review. *Soft Matter*. 2011, roč. 7, č. 8, s. 3701. ISSN 1744-683X.
- [47] PAO - Low Viscosity. *RB PRODUCTS, INC.* 2021. Dostupné z: <https://www.rbproductsinc.com/pao-low-viscosity>
- [48] BASF. *Carbonyl Iron Powder*. 2012. Dostupné z: https://www.dispersions-pigments.basf.com/portal/load/fid827906/CIP_General_PO_e.pdf
- [49] *Bruker: UMT TriboLab*. nedatováno. Dostupné z: <https://www.bruker.com/products/surface-and-dimensional-analysis/tribometers-and-mechanical-testers/umt-tribolab/overview.html>
- [50] BRUKER. *ContourGT-X 3D Optical Profiler*. 2019 [vid. 27. duben 2019]. Dostupné z: <https://bit.ly/2XPhNw4>
- [51] BRUKER. *ContourGT-X 3D Optical Microscope*. 2019. Dostupné z: <https://www.bruker.com/products/surface-and-dimensional-analysis/3d-optical-microscopes/contourgt-x/learn-more.html>
- [52] Předpětí a utahovací momenty. *Bossard*. [vid. 12. prosinec 2020]. Dostupné z: https://media.bossard.com/-/media/bossard-group/website/documents/technical-resources/cz/f_047_cz.pdf
- [53] LAKE, G. J. *Fatigue and Fracture of Elastomers*. 1995. ISSN 0035-9475. Dostupné z: doi:
- [54] FUKAHORI, Yoshihide a Hirotaka YAMAZAKI. Mechanism of rubber abrasion. Part I: Abrasion pattern formation in natural rubber vulcanizate. *Wear*. 1994, roč. 171, č. 1–2, s. 195–202. ISSN 00431648.

9 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN

9.1 Seznam zkratk

MR	Magnetoreologický
PAO	Polyalfaolefin
COF	Koeficient tření
PTFE	Polytetrafluorethylen (teflon)
PU	Polyuretan
NBR	Nitril-butadien
SBR	Styren-butadien

9.2 Seznam veličin

Ra	(μm)	Průměrná aritmetická úchylka profilu
LDE	(J/cm^3)	Objemová hustota disipované energie v MR kapalině

10 SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ

Obr. 1-1	Řešení GM Magnetic Ride Control z automobilu Cadillac Seville [1]	13
Obr. 2-1	Magnetoreologická kapalina – a) mimo magnetické pole, b) krátce po začátku působení mag. pole, c) v magnetickém poli [8].....	15
Obr. 2-2	Ventilový mód [10]	15
Obr. 2-3	Smykový mód [10].....	16
Obr. 2-4	Tlakový mód [10].....	16
Obr. 2-5	Schéma a regulace MR tlumiče [11] (upraveno)	17
Obr. 2-6	Vliv materiálu na opotřebení [14].....	19
Obr. 2-7	Vliv parametrů na opotřebení materiálu [15]	19
Obr. 2-8	Výsledky z měření opotřebení [17].....	20
Obr. 2-9	Výsledky pro experiment v konfiguraci pin-on-disk - vlevo: 50 N a 297 rpm, uprostřed: 100 N a 297 rpm, vpravo: 50 N a 425 rpm [18]	21
Obr. 2-10	Velikost opotřebení v závislosti na tvrdost abrazivních částic a poměru tvrdosti částice a materiálu [19]	21
Obr. 2-11	Závislost resistance vůči abrazi na tvrdosti materiálu [20].....	22
Obr. 2-12	Závislost opotřebení na velikosti (přibližně stejné výsledky vykazovaly všechny měření) [21]	23
Obr. 2-13	Vliv tvrdosti (vlevo) a tvaru (vpravo) na opotřebení [22]	24
Obr. 2-14	Vlevo: závislost odběru materiálu na koncentraci částic pro MR kapalinu s olejem HV60, Vpravo: závislost koeficientu tření na koncentraci částic [23]	25
Obr. 2-15	Velikost poměrného opotřebení těsnění v závislosti na podmínkách [25]...	26
Obr. 2-16	Konfigurace pro laboratorní testy: Nahoře „reálný“ kontakt, dole konfigurace pin-on-plate [26]	27
Obr. 2-17	Výsledky testů (pro konfiguraci pin-on-plate různé maziva jak uvedeno v kap. 2.8.10) [26].....	27
Obr. 2-18	Opotřebení standartního těsnění [27]	28
Obr. 2-19	Velikost opotřebení v závislosti na velikosti abrazivních částic [28]	29
Obr. 2-20	(a – c) Závislost opotřebení na zatížení pro různé materiály – a) drsnost papíru 1200, b) 800, c) 400, d) Závislost opotřebení na drsnosti papíru pro různé materiály [29]	30

Obr. 2-21	Zkoumané materiály [30]	31
Obr. 2-22	Výsledky měření opotřebení [30]	31
Obr. 2-23	vlevo: závislost velikosti COF v čase na rychlosti, vpravo: opotřebení v závislosti na rychlosti [31]	32
Obr. 2-24	vlevo: vliv rychlosti a velikosti částic na COF, vpravo: vliv částic a rychlosti na opotřebení [31]	33
Obr. 2-25	vlevo: vliv rychlosti a koncentrace částic na COF, vpravo: vliv koncentrace a rychlosti na opotřebení [31]	33
Obr. 3-1	Opotřebení těsnícího kroužku	36
Obr. 4-1	Schéma práce	40
Obr. 4-2	Schéma navržené konfigurace (zelená barva vzorek, červená barva pin)	41
Obr. 4-3	Koncept upnutí pinu č. 1	42
Obr. 4-4	Koncept uchycení č. 2	42
Obr. 4-5	Schéma postupu vyhodnocení	43
Obr. 4-6	Opotřeбенý vzorek, žlutě skeny drážky (5 skenů)	44
Obr. 4-7	Jeden sken drážky, žlutě řez	44
Obr. 4-8	Příklad profilu drážky (červeně nulová hodnota)	45
Obr. 4-9	Případ opotřebení drážky pro různý počet cyklů, popis použitých metod pro porovnání výsledků	46
Obr. 4-10	Opotřeбенá MR kapalina (malá tekutost)	49
Obr. 4-11	Namíchaná MR kapalina	50
Obr. 4-12	Schéma testovaných kombinací pro různé testy	51
Obr. 4-13	Tribometr Bruker UMT Triboab [49] (vlevo) a profilometr Bruker Contour GT-X [50]	52
Obr. 5-1	Vlevo: Vyrobený držák pro pin (i s válcovým pinem), vpravo: pin uchycený v tribometru	54
Obr. 5-2	Vlevo: Vlepené vzorky z SBR a připravené vzorky, vpravo: uchycení vzorku do vaničky	55
Obr. 5-3	Opotřeбенá drážka prvotními parametry (neměřitelné)	56
Obr. 5-4	Opotřebení drážky zvětšenou silou	56
Obr. 5-5	Opotřeбенá drážka s finálními parametry testu	57

Obr. 5-6	Graf COF na čase při záběhu (relativně vysoký rozptyl z důvodu slip-stick efektu)	57
Obr. 5-7	Velikost opotřebení různých materiálů v kapalině MRF-132DG.....	58
Obr. 5-8	a) nový pin, b) pin v kontaktu s NBR, c) pin v kontaktu s PU (bílá oblast – kontakt).....	59
Obr. 5-9	Velikost opotřebení materiálu H-PU95FDA v závislosti na koncentraci kapalin	60
Obr. 5-10	Vliv opotřebení kapaliny MRF-132DG na opotřebení materiálu H-PU95FDA	61
Obr. 5-11	Opotřeбенý pin po testu v opotřeбенé kapalině (bílá oblast – kontakt)	62
Obr. 5-12	Vliv součástí MR kapalin na složkách kapalin	63
Obr. 5-13	Opotřeбенí pinu v suspenzi (bílá oblast – styková plocha, červená – oblast vstupu).....	64
Obr. 6-1	Možný pohyb částic v daném kontaktu (červeně).....	65
Obr. 6-2	Možnost použití dvou O-kroužků.....	66
Obr. 6-3	Místo největšího opotřeбенí pinu (červeně) a jeho poloha vůči vzorku v krajních polohách pinu	68
Obr. 6-4	Schéma vlivů na životnost těsnění.....	68
Obr. P-1	Velikost opotřeбенí polyuretanových materiálů na počtu cyklů	80
Obr. P-2	Velikost opotřeбенí ostatních materiálů na počtu cyklů	81
Obr. P-3	Velikost abrazivity kapalin dle koncentrace částic na počtu cyklů.....	82
Obr. P-4	Velikost abrazivity různých druhů MR kapalin na počtu cyklů.....	83
Obr. P-5	Velikost abrazivity kapalin dle stáří kapaliny na počtu cyklů	84
Obr. P-6	Testovací konfigurace pro test ocel-ocel	85
Obr. P-7	Velikost opotřeбенí vzorku v různých kapalinách v závislosti na počtu cyklů.	86

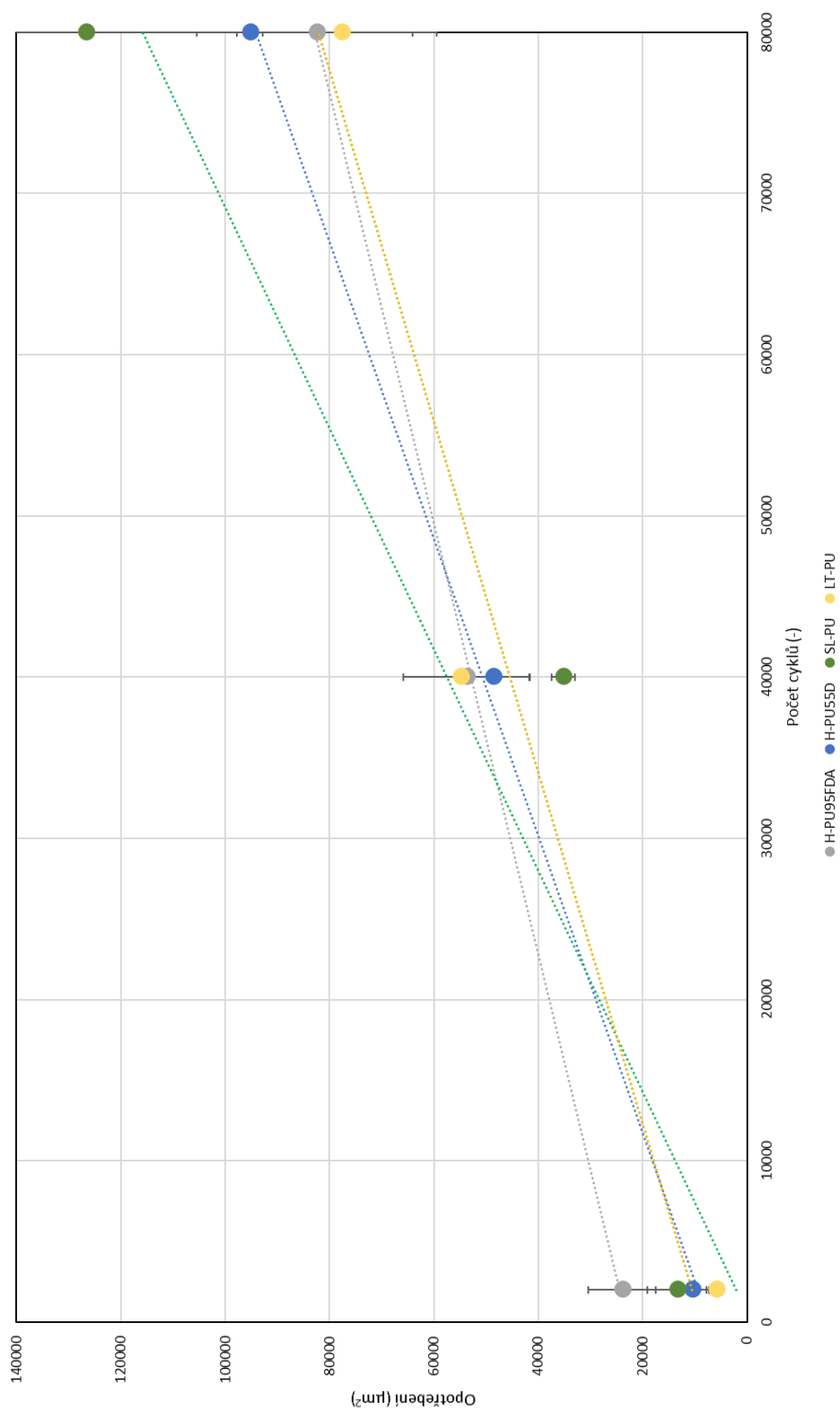
11 SEZNAM TABULEK

Tab. 4-1	Testované materiály [34, 35] (*přepočet z Shore D [36])	47
Tab. 4-2	Kapaliny firmy LORD	47
Tab. 4-3	Parametry kapaliny MRC S1L (*dopočtená hodnota)	48
Tab. 5-1	Velikost koeficientu tření v závislosti na použitém materiálu těsnění	58
Tab. 5-2	Velikost koeficientu tření dle opotřebovanosti MR kapaliny	61
Tab. 5-3	Velikost koeficientu tření dle použité kapaliny	63

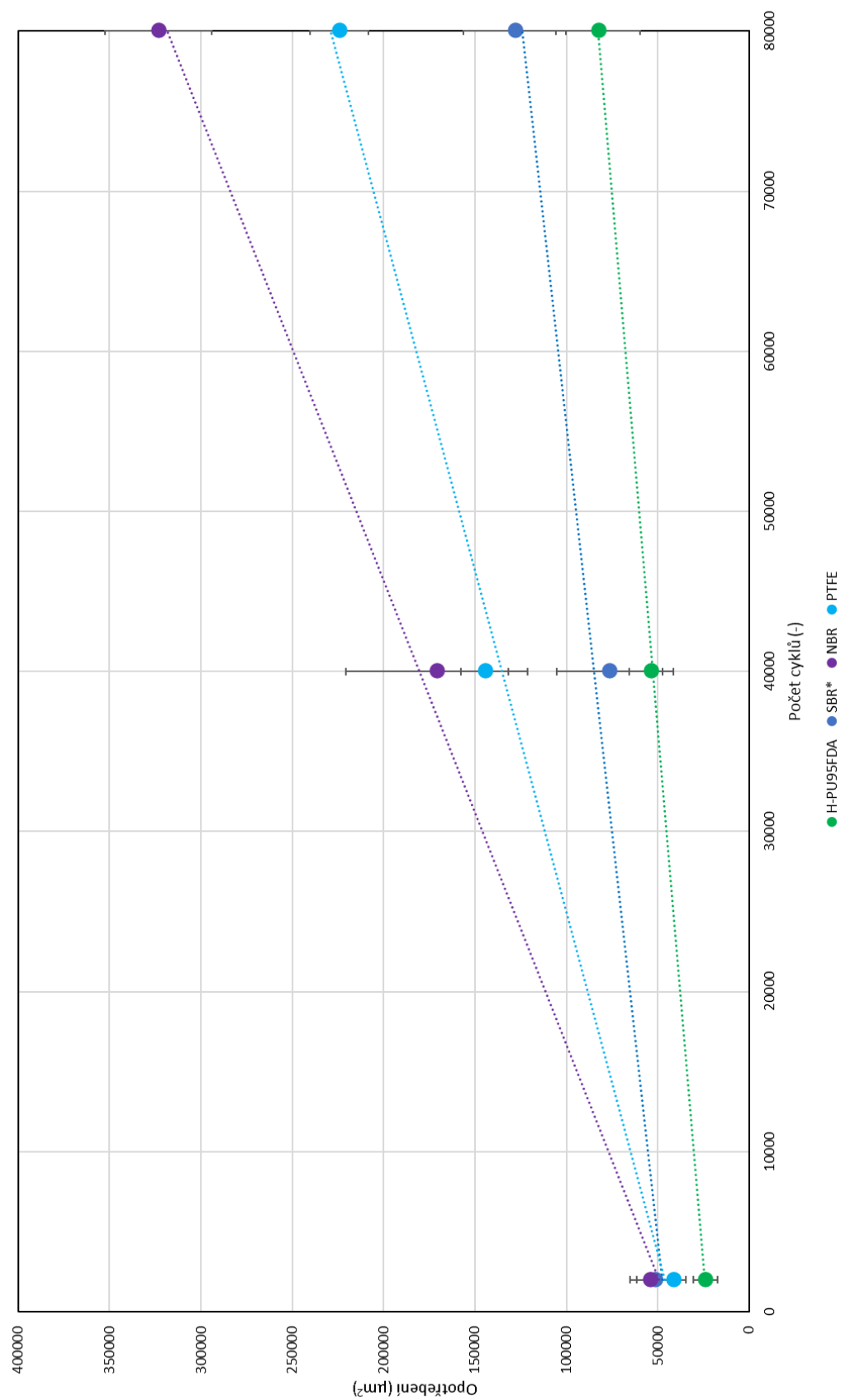
12 SEZAM PŘÍLOH

Příloha 1	Odolnost polyuretanových těsnění.....	80
Příloha 2	Odolnost proti opotřebení ostatních materiálů (porovnání s H-PU95FDA)	81
Příloha 3	Abrazivita kapalin v závislosti na koncentraci	82
Příloha 4	Vliv modifikace na abrazivitu MR kapalin	83
Příloha 5	Vliv stáří kapaliny na abrazivitu.....	84
Příloha 6	Konfigurace testu ocel-ocel	85
Příloha 7	Výsledky abrazivnosti MR kapalin v kontaktu ocel-ocel.....	86

Příloha 1 Odolnost polyuretanových těsnění

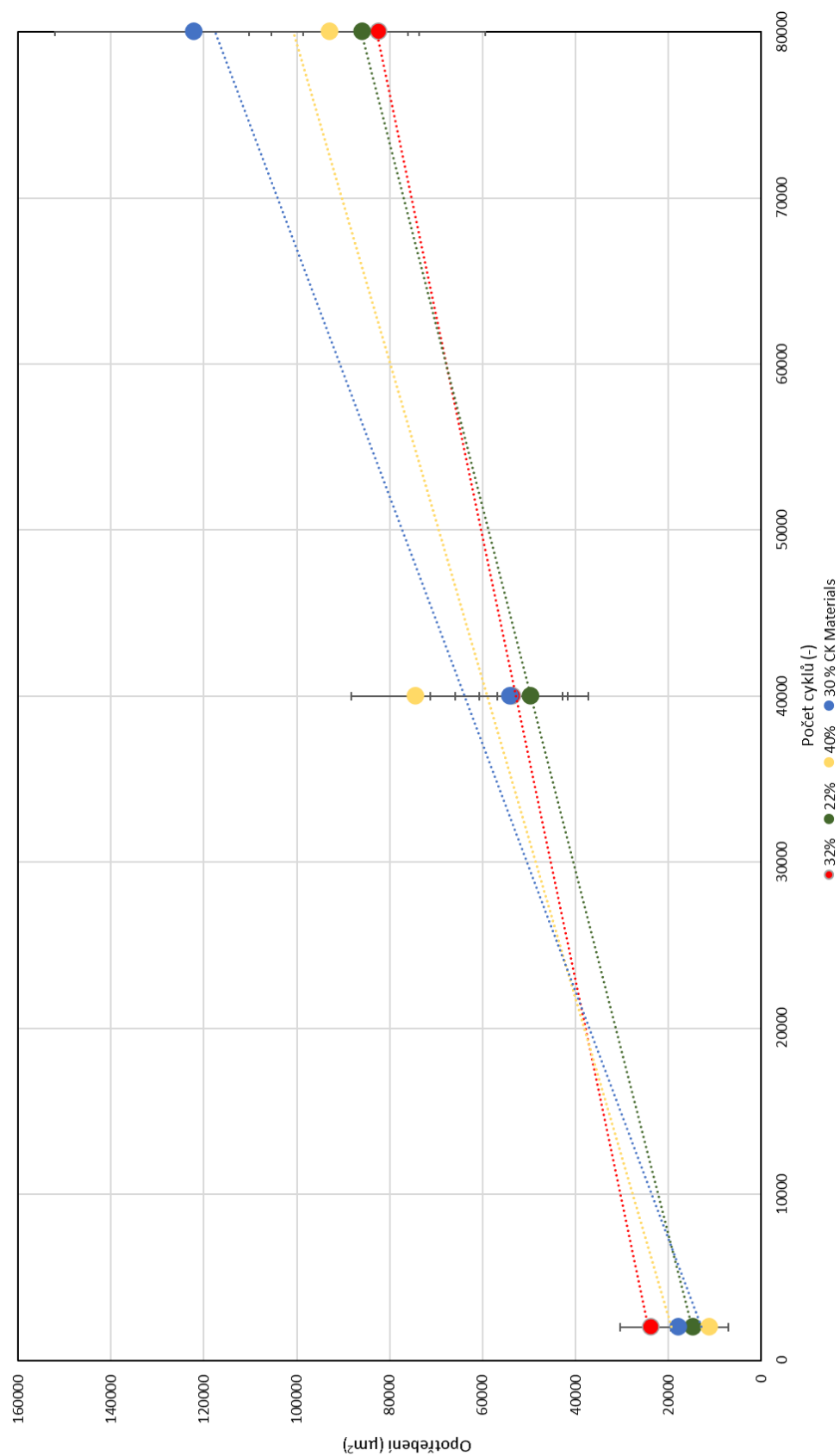


Obr. P-1 Velikost opotřebení polyuretanových materiálů na počty cyklů

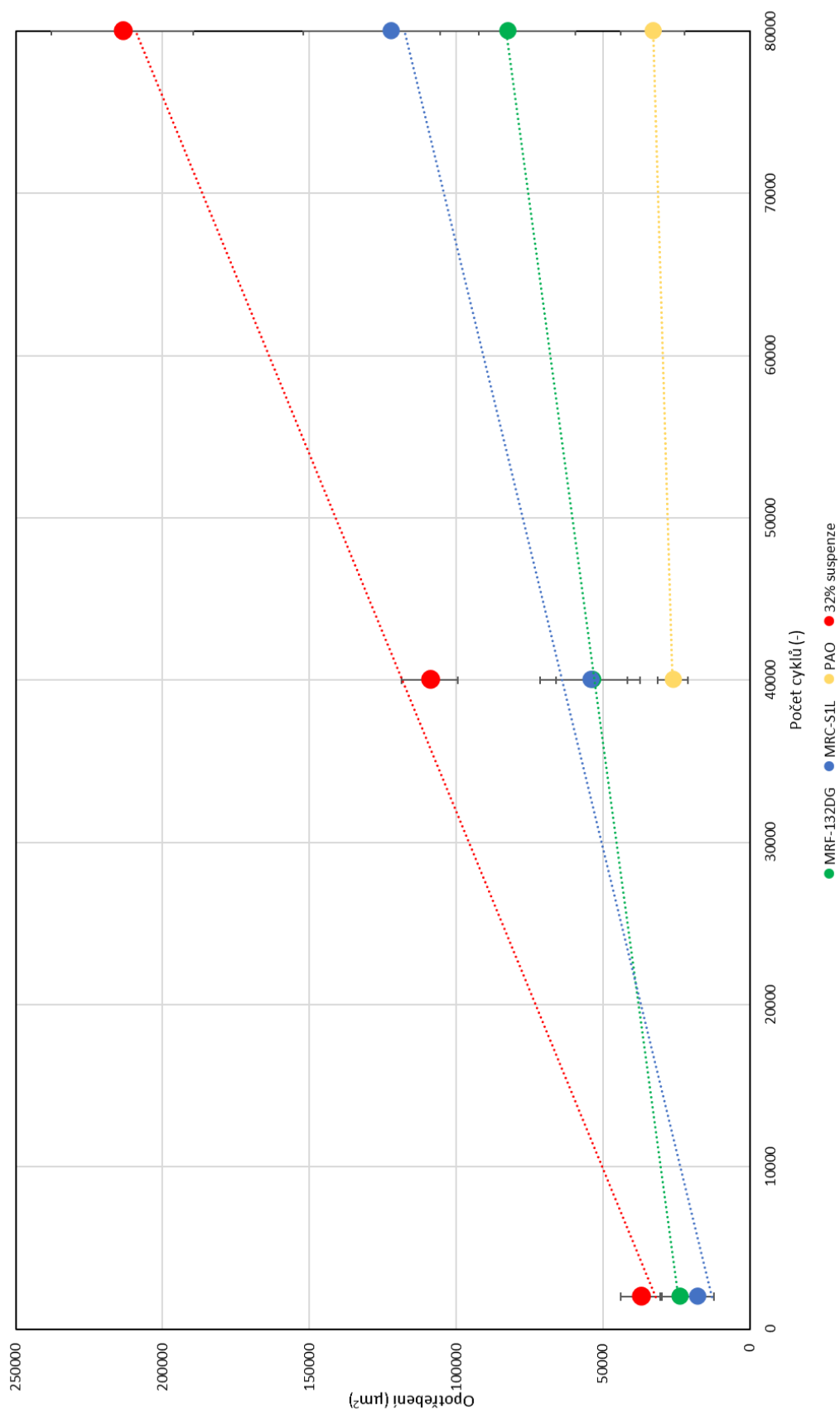


Obr. P-2 Velikost opotřebení ostatních materiálů na počtu cyklů

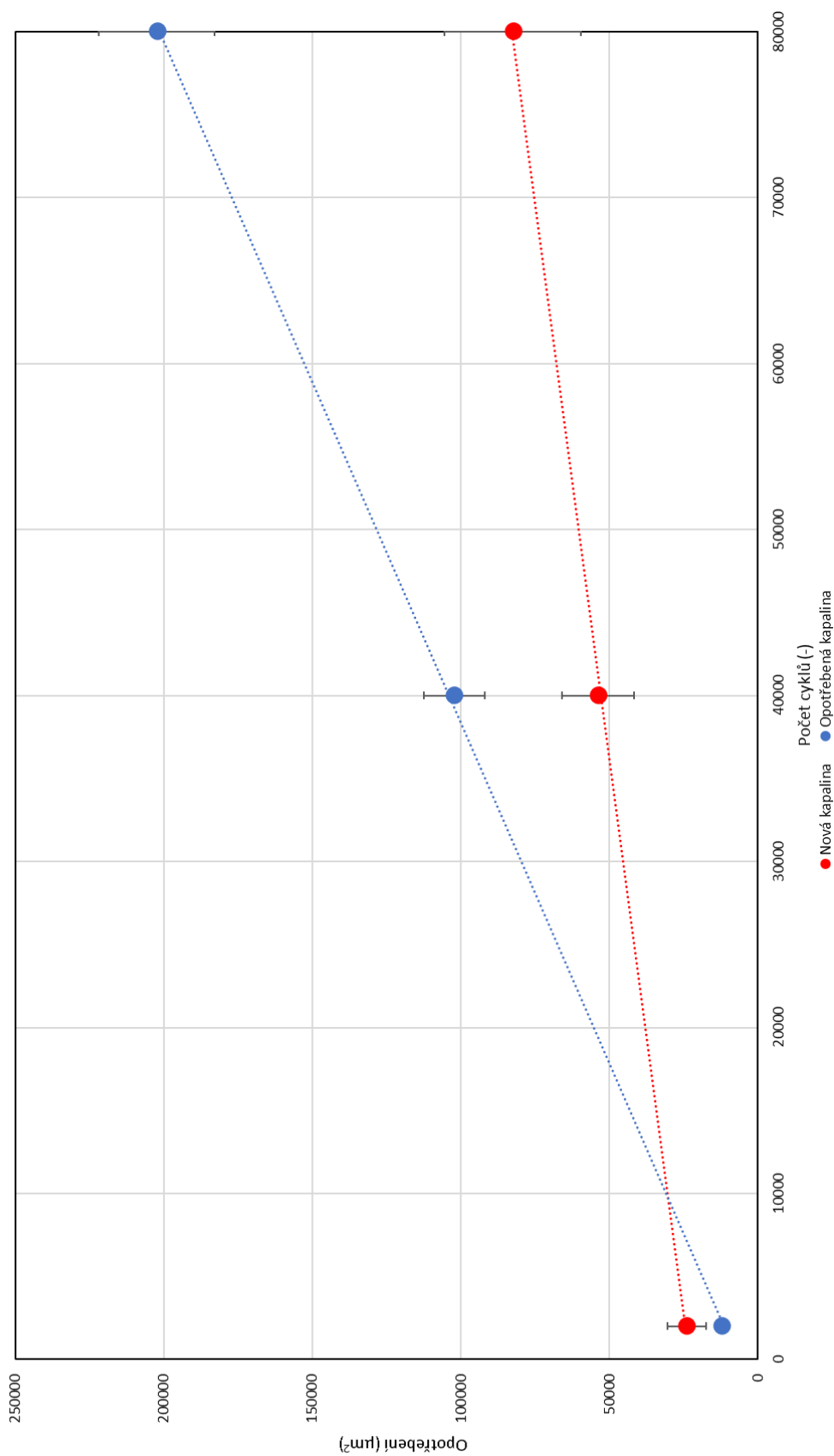
Příloha 3 Abrazivita kapalin v závislosti na koncentraci



Obr. P-3 Velikost abrazivity kapalin dle koncentrace částic na počtu cyklů



Obr. P-4 Velikost abrazivity různých druhů MR kapalin na počtu cyklů

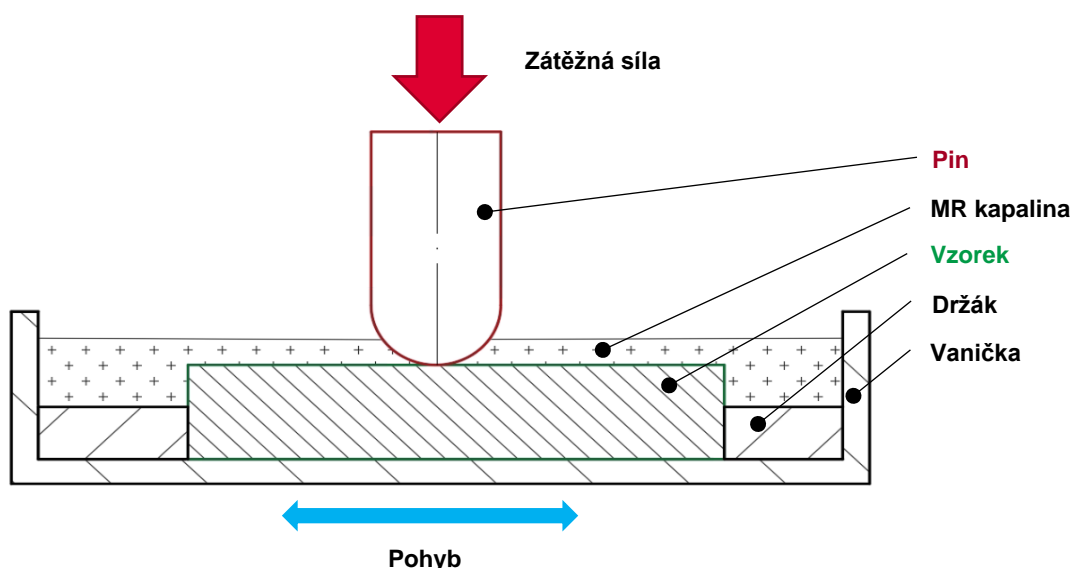


Obr. P-5 Velikost abrazivity kapalin dle stáří kapaliny na počtu cyklů

V rámci testů s provedených testů byly provedeny i testy abrazivity MR kapalin, resp. závislosti abrazivity na koncentraci MR částic. Protože se v některých tlumicích může vyskytnout i materiálový styk ocel-ocel, je vhodné vědět, jestli volba MR kapaliny z hlediska těsnění je vhodná i z hlediska jiných částí tlumiče. Jde v podstatě o rozšíření výsledků z mojí předchozí bakalářské práce [34]. Z této práce byly převzaty testovací podmínky i konfigurace, aby mohlo být navázáno na výsledky práce. Testovalo se v konfiguraci pin-on-flat (obr. p-6), kde pinem byla ložisková kulička o průměru 6,35 mm a testovacím vzorkem byl blok oceli S235, která odpovídá trubkové oceli E235, která se používá pro výrobu těla MR tlumice. Vyhodnocení proběhlo stejně jako v hlavní práci popsané v kapitole 4.2.3 (tzn, pomocí profilometru Bruker a programu MATLAB), akorát vzhledem k použití ocelového vzorku, bylo možné přepočíst plošné úbytky na hmotnostní.

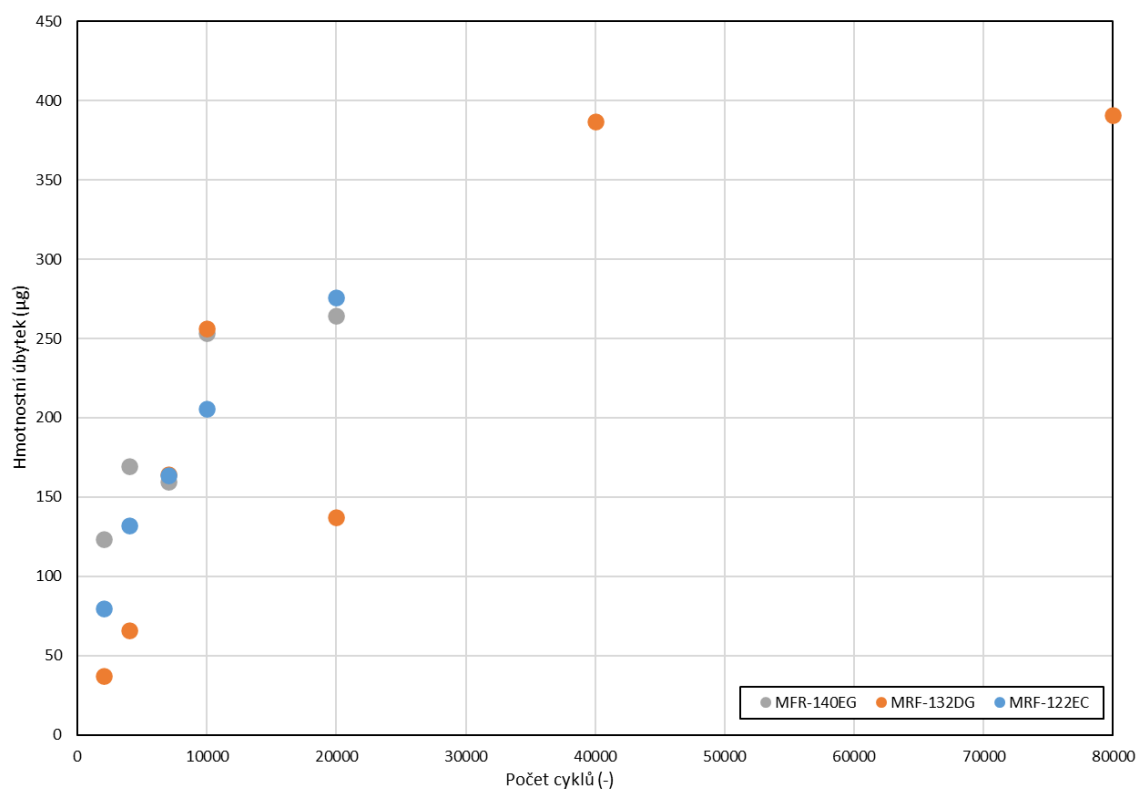
Výsledky byly pro tuto práci rozšířeny o další výsledky, a to o testování pro počet cyklů nad 10000 cyklů za jeden testovací cyklus. Pro tuto práci byly již zmíněné výsledky rozšířeny o výsledky pro počet cyklů 20000, a pro kapalinu MRF-132DG, která byla zvolena jako etalon, také byly provedeny testy pro počet cyklů 40000 a 80000 pro zjištění trendu opotřebení pro vyšší zátěžný cyklus. Zvolené testovací podmínky byly zvoleny s ohledem na moji předešlou práci takto:

- amplituda: 5 mm
- frekvence pohybu: 4 Hz
- zátěžná síla: 80 N
- počet cyklů: 20000, 40000 (MRF-132DG) a 80000 (MRF-132DG)
- struktura podložky: Ra 0,2



Obr. P-6 Testovací konfigurace pro test ocel-ocel

Z výsledků na obr. P-7 níže vyplynulo, že abrazivita MR kapalin se se zvětšující koncentrací částic v kapalině nemění, a tudíž jsou výsledky tímto trendem velice podobné výsledkům získaným měření na polymerní vzorku v kapitole 5.2.3, a tím pádem výběr kapaliny dle koncentrace by neměl nijak ovlivnit životnost tlumiče.



Obr. P-7 Velikost opotřebení vzorku v různých kapalinách v závislosti na počtu cyklů